FORUM HOLZBAU
BAUPHYSIK & GEBÄUDETECHNIK

7. Internationale Fachtagung
Bauphysik & Gebäudetechnik (BGT)
Graf-Zeppelin-Haus Friedrichshafen, Deutschland
24./25. April 2024

Holzbau | Trockenbau | Innenausbau



Herausgeber: FORUM **HOLZBAU**
Bahnhofplatz 1
2502 Biel/Bienne
Schweiz
T +41 32 327 20 00

Bearbeitung und Satz: FORUM **HOLZBAU**, Katharina Uebersax, Katja Rossel

© 2024 by FORUM **HOLZBAU**, Biel/Bienne, Schweiz
ISBN 978-3-906226-62-0

Inhalt

AUFTAKT

Anders Bauen – NEUE ANSÄTZE

Neue Freiheit für einfacheres Bauen – Der neue Gebäudetyp-e 13
Florian Dilg, Architektur: Zwingel / Dilg, München, Deutschland

A1

Schallschutz – neues bei den Werkzeugen und Anforderungen

Lignum-Dokumentation Schallschutz im Holzbau – Grundlagen, Planung und konstruktive Umsetzung 21
Bernhard Furrer, Lignum Holzwirtschaft Schweiz, Zürich, Schweiz

Übertragungsfunktionen – einfache Prognose des Lärms bei gebäudetechnischen Anlagen 31
Dr. Fabian Schöpfer, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland

Die DIN 4109 und weitere Richtlinien – viel Neues oder Durcheinander? 43
Martin Schneider, Hochschule für Technik Stuttgart, Deutschland
Heinz-Martin Fischer, Hochschule für Technik Stuttgart, Deutschland

A2

Mit Schallschutz wirtschaftlich Bauen!

Schallschutz – Projektbeispiele für ökonomisches Bauen 55
Prof. Dr. Anton Kraler, Universität Innsbruck, Österreich

Schalltechnisch optimierte Konstruktionen im Holzbau – nicht immer nur teuer! 63
Prof. Dr. Andreas Rabold, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland
Adrian Blödt, IB Blödt / Blödt Holzkomplettbau, Kohlberg, Deutschland

Schallschutz gegen Außenlärm – Ergebnisse eines Forschungsvorhabens 81
Dr. Andreas Meier, Müller-BBM Building, Planegg, Deutschland

A3

Schallschutz im Holzbau – neue Aspekte

Massivholzdecken mit verbesserter Trittschalldämmung – funktionale Formgebung mit akustischen schwarzen Löchern 97
Dr. Stefan Schoenwald, Empa, Dübendorf, Schweiz

Stoßstellendämm-Maße im Massivholzbau Messungen und Finite Element – Berechnungen 111
Stefan Grießhammer, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland
Andreas Rabold und Silas Pfattheicher, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland

Aufzugschächte in Holzbauweise – Konstruktionsprinzipien und Prognosemöglichkeiten für den Schallschutz 127
Adrian Blödt, IB Blödt / Blödt Holzkomplettbau, Kohlberg, Deutschland
Prof. Dr. Christoph Höller, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Deutschland

B1

Fassaden neu gedacht

Fassadenintegration von Photovoltaik und Begrünung im vorgefertigten Holzbausystem 143
Dr. Claudia Hemmerle, Technische Universität München, Deutschland
Prof. Manfred Stieglmeier, Fachhochschule Salzburg, Kuchl, Österreich
Christine S. Hani, Technische Universität München, Deutschland
Elisabeth Faßbender, Technische Universität München, Deutschland

Coole Hülle – Holzfassaden bauphysikalisch beleuchtet 157
Dr. Bernd Nusser, Holzforschung Austria, Wien, Österreich
Mara Schumacher M.Sc., Holzforschung Austria, Wien, Österreich
Dr. Christian Lux, Holzforschung Austria, Wien, Österreich
Johannes Tieben, Holzforschung Austria, Wien, Österreich

Renvelope: Energy Adaptive Shell – serielle CO_2-neutrale Gebäudesanierung 173
Dr. Tobias Weiss, AEE – Institut für Nachhaltige Technologien, Gleisdorf, Österreich

B2
BIM und KI in Bauphysik und Gebäudetechnik

Gebäude- und Anlagensimulation im Planungsprozess – Möglichkeiten mit OpenBIM 185
Elisabeth Eckstädt, Fraunhofer IIS/EAS, Dresden, Deutschland

BIM und Schallschutz – kommerzielle Tools und die Zukunft 201
Dr. Camille Châteauvieux-Hellwig, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland
Yvonne Weise, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland

Anwendungsbereiche der KI-Potenziale in der Bauphysik und Gebäudetechnik 217
Clara-Larissa Lorenz, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Deutschland
Jérôme Frisch und Christoph van Treeck, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Deutschland

B3
Schwingungen von Holzdecken – neues aus Normung und Forschung

Eurocode 5 – neue Regeln zur Gebrauchstauglichkeit 229
Dr. Roland Maderebner, Universität Innsbruck, Österreich
Thomas Hillberger, Universität Innsbruck, Österreich

Alles schwingt – Erfahrungen mit einem XXL-Deckenprüfstand 239
Prof. Dr. Patricia Hamm, Hochschule Biberach, Deutschland

Aktiv geregelte Schwingungsdämpfer zur Reduzierung der Schwingbeschleunigung 253
Thomas Hillberger, Universität Innsbruck, Österreich
Roland Maderebner, Universität Innsbruck, Österreich
Philipp Dietsch, Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland

A4
Umgang mit dem Brandverhalten von Holz

Zuordnungstabellen für das Brandverhalten von Baustoffen im D-A-CH Raum – Folgen für den Holzbau 265
Hanno Werning, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland

Bauen mit Holz bis zur Hochhausgrenze 283
Dr. Michael Merk, FIRE & TIMBER .ING, FIRE & TIMBER PrüfSV, München, Deutschland

Brandschutzkonzepte mit brennbaren Baustoffen – die Schweiz auf dem Holzweg? 293
Reinhard Wiederkehr, Makiol Wiederkehr, Beinwil am See, Schweiz

A5
Bewertung und Bemessung von Holz-Bauteilen

Neue Möglichkeiten durch Bauteilkataloge im Holzbau 303
Dr. Mandy Peter, bauart Konstruktions, München, Deutschland

Holzbauteile im Bestand – Konzepte und Ideen zur Ausführung 311
Prof. Hanspeter Kolb, Berner Fachhochschule, Holzbauexperten, Biel, Schweiz

A6
Fassadenkonstruktionen in und auf Holz

Prüfverfahren für das Brandverhalten von Fassaden Einfluss auf Holzfassaden 327
Josef Huber, IBS-Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung, Linz, Österreich

Fassadenbegrünung an mehrgeschossigen Gebäuden aus brandschutztechnischer Sicht 335
Dr. Thomas Engel, Technische Universität München, Deutschland

Darstellung des Brandverhaltens von Holzaussenbauteilen mittels numerisch gestützter Rechenverfahren 347
Florent Lushta und Gereon Schiffer, BIQS Brandschutzingenieure, Zürich, Schweiz

B4
WÄRMEPUMPE – die Wärmeversorgung der Zukunft?

Wärmepumpe ist nicht gleich Wärmepumpe – eine Systemübersicht 355
Prof. Uli Spindler, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland

Die neue Wärmepumpen-Generation: Propan oder R32? – Effizienz und Dimensionierung im Wohngebäudebestand 365
Prof. Dr. Michael Schaub, Hochschule Coburg, Deutschland

Solide Planung als Grundlage effizienter Wärmepumpensysteme 377
Prof. Dr. Fabian Ochs, Universität Innsbruck, Österreich

B5
Holzbau und Technische Gebäudeausrüstung (TGA)

Installationskonzepte für die TGA-Modularisierung im mehrgeschossigen Holzbau 389
Petra Fortmüller, Technische Universität Graz, Österreich

Einfacher Holzbau dank smarter Energietechnik 403
Michael Schär, schaerholzbau, Altbüron, Schweiz

B6
Raumlüftung

Wand-Pendellüfter – Möglichkeiten und Grenzen bei Schall, Feuchte und Energieeinsparung 411
Dr. Jan Krüger, Hochschule für Technik, Stuttgart, Deutschland

Strömungs- und Geräuschanalyse eines dezentralen Lüftungsgerätes mit PIV und akustischer Kamera 423
Markus Wirnsberger, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland
Tobias Kruse, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland

Neues zur Raumlüftung aus der Schweiz – natürlich, hybrid und Low-Tech 431
Dr. Caroline Hoffmann, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz, Schweiz

EPILOG
Anders Bauen – ZUKUNFT DENKEN

Nachhaltig aufbrechen – Wegweiser Holzbau 445
Prof. Dr. Isabell Nemeth, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland
Miaomiao He, Technische Hochschule Rosenheim, Deutschland

Moderatoren

Prof. Dr. Aschaber Johannes
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 24 03
johannes.aschaber@th-rosenheim.de

Prof. Dr. Bauer Dan
Hochschule für Technik Stuttgart
70013 Stuttgart, Deutschland

+49 7118 926 27 68
dan.bauer@hft-stuttgart.de

Prof. Engels Isabel
Berner Fachhochschule
2504 Biel/Bienne, Schweiz

+41 32 344 17 66
isabel.engels@bfh.ch

Fuhrmann Christoph
Berner Fachhochschule
2504 Biel/Bienne, Schweiz

+41 31 848 63 31
christoph.fuhrmann@bfh.ch

Prof. Germerott Uwe
Berner Fachhochschule
2504 Biel/Bienne, Schweiz

+41 32 344 03 50
uwe.germerott@bfh.ch

Prof. Kohaus Maren
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 29 40
maren.kohaus@th-rosenheim.de

Prof. Dr. h.c. Köster Heinrich
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 120
heinrich.koester@th-rosenheim.de

Prof. Dr. Kraler Anton
Universität Innsbruck
6020 Innsbruck, Österreich

+43 5125 076 32 06
anton.kraler@uibk.ac.at

Prof. Dr. Krause Harald
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 24 15
harald.krause@th-rosenheim.de

Dr. Mayr Andreas
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 25 32
andreas.mayr@th-rosenheim.de

Prof. Dr. Mitterhofer Matthias
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 80 50
matthias.mitterhofer@th-rosenheim.de

Prof. Dr. Schanda Ulrich
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 24 07
ulrich.schanda@th-rosenheim.de

Schneider Martin
Hochschule für Technik Stuttgart
70174 Stuttgart, Deutschland

+49 7118 926 28 36
martin.schneider@hft-stuttgart.de

Werning Hanno
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 23 35
hanno.werning@th-rosenheim.de

Referenten

Dr. Aicher Simon
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
70569 Stuttgart, Deutschland

+49 7116 856 22 87
simon.aicher@mpa.uni-stuttgart.de

Blödt Adrian
Blödt Holzkomplettbau GmbH
92702 Kohlberg, Deutschland

+49 9608 583
info@holzbau-bloedt.de

Dr. Châteauvieux-Hellwig Camille
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 24 79
camille.chateauvieux-hellwig@th-rosenheim.de

Dilg Florian
ARCHiTEKTUR:ZWiNGEl/DilG
81371 München, Deutschland

+49 8946 139 461
florian@architektur-zwingel-dilg.eu

Eckstädt Elisabeth
Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen
01187 Dresden, Deutschland

+49 351 464 07 01
elisabeth.eckstaedt@eas.iis.fraunhofer.de

Dr. Engel Thomas
Technische Universität München
80333 München, Deutschland

+49 8928 928 679
engel@tum.de

Fortmüller Petra
Technische Universität Graz
8010 Graz, Österreich

+43 3168 736 259
petra.fortmueller@tugraz.at

Furrer Bernhard
Lignum - Holzwirtschaft Schweiz
8008 Zürich, Schweiz

+41 44 267 47 80
bernhard.furrer@lignum.ch

Grießhammer Stefan
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 25 33
stefan.griesshammer@th-rosenheim.de

Prof. Dr. Hamm Patricia
Hochschule Biberach
88400 Biberach, Deutschland

+49 7351 582 524
hamm@hochschule-bc.de

Dr. Hemmerle Claudia
Technische Universität München
80333 München, Deutschland

+49 8928 922 964
claudia.hemmerle@tum.de

Hillberger Thomas
Universität Innsbruck
6020 Innsbruck, Österreich

+43 512 507 632 08
thomas.hillberger@uibk.ac.at

Dr. Hoffmann Caroline
Fachhochschule Nordwestschweiz
4132 Muttenz, Schweiz

+41 61 228 54 59
caroline.hoffmann@fhnw.ch

Prof. Dr. Höller Christoph
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
93053 Regensburg, Deutschland

+49 9419 439 855
christoph.hoeller@oth-regensburg.de

Huber Josef
IBS – Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung Gesellschaft m.b.H.
4020 Linz, Österreich

+43 7327 617 849
j.huber@ibs-austria.at

Prof. Kolb Hanspeter
Berner Fachhochschule
2504 Biel/Bienne, Schweiz

+41 31 848 64 41
hanspeter.kolb@bfh.ch

Prof. Dr. Kraler Anton
Universität Innsbruck
6020 Innsbruck, Österreich

+43 5125 076 32 06
anton.kraler@uibk.ac.at

Dr. Krüger Jan
Hochschule für Technik Stuttgart
70174 Stuttgart, Deutschland

+49 7118 926 29 82
jan.krueger@hft-stuttgart.de

Kruse Tobias
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 25 88
tobias.kruse@th-rosenheim.de

Prof. Dr. Langer Sabine C.
Technische Universität Braunschweig
38106 Braunschweig, Deutschland

+49 5313 918 770
s.langer@tu-braunschweig.de

Prof. Ph. D. Levermann Anders
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e. V.
14473 Potsdam, Deutschland

+49 3312 882 560
Anders.Levermann@pik-potsdam.de

Dr. Lorenz Clara-Larissa
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
52056 Aachen, Deutschland

+49 2418 025 150
lorenz@e3d.rwth-aachen.de

Lushta Florent
BIQS Brandschutzingenieure AG
8048 Zürich, Schweiz

+41 43 336 38 30
florent.lushta@biqs.ch

Dr. Maderebner Roland
Universität Innsbruck
6020 Innsbruck, Österreich

+43 5125 076 32 09
roland.maderebner@uibk.ac.at

Dr. Meier Andreas
Müller-BBM Building Solutions GmbH
82152 Planegg, Deutschland

+49 8935 404 86 37
Andreas.Meier@mbbm-bso.com

Dr. Merk Michael
FIRE & TIMBER .ING GmbH
80333 München, Deutschland

+49 8928 922 40 46
merk@ft-ing.de

Mindrup Klaus
bauart TGA GmbH & Co. KG
48155 Münster, Deutschland

+49 2506 300 284 500
mindrup@bauart-ingenieure.de

Prof. Dr. Nemeth Isabell
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 25 29
isabell.nemeth@th-rosenheim.de

Dr. Nusser Bernd
Holzforschung Austria
1030 Wien, Österreich

+43 1798 262 371
b.nusser@holzforschung.at

Prof. Dr. Ochs Fabian
Universität Innsbruck
6020 Innsbruck, Österreich

+43 5125 076 36 03
fabian.ochs@uibk.ac.at

Dr. Peter Mandy
bauart Konstruktions GmbH & Co. KG
81925 München, Deutschland

+49 8913 928 33 60
peter@bauart-ingenieure.de

Prof. Dr. Rabold Andreas
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 25 33
andreas.rabold@th-rosenheim.de

Schär Michael
schaerholzbau ag
6147 Altbüron, Schweiz

+41 62 917 70 84
michael.schaer@schaerholzbau.ch

Prof. Dr. Schaub Michael
Hochschule Coburg
96450 Coburg, Deutschland

+49 9561 317 351
Michael.Schaub@hs-coburg.de

Schiffer Gereon
BIQS Brandschutzingenieure AG
8048 Zürich, Schweiz

+41 43 336 38 42
gereon.schiffer@biqs.ch

Schneider Martin
Hochschule für Technik Stuttgart
70174 Stuttgart, Deutschland

+49 7118 926 28 36
martin.schneider@hft-stuttgart.de

Dr. Schoenwald Stefan
Empa
8600 Dübendorf, Schweiz

+41 58 765 65 79
stefan.schoenwald@empa.ch

Dr. Schöpfer Fabian
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 25 89
fabian.schoepfer@th-rosenheim.de

Prof. Spindler Uli
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 23 30
uli.spindler@th-rosenheim.de

Prof. Stieglmeier Manfred
Fachhochschule Salzburg
5431 Kuchl, Österreich

+43 5022 112 706
manfred.stieglmeier@fh-salzburg.ac.at

Weise Yvonne
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 80 50
yvonne.weise@th-rosenheim.de

Dr. Weiss Tobias
AEE - Institut für Nachhaltige Technologien
8200 Gleisdorf, Österreich

+43 3112 588 63 71
t.weiss@aee.at

Werning Hanno
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 23 35
hanno.werning@th-rosenheim.de

Wiederkehr Reinhard
Makiol Wiederkehr AG
5712 Beinwil am See, Schweiz

+41 62 765 15 35
wiederkehr@holzbauing.ch

Wirnsberger Markus
Technische Hochschule Rosenheim
83024 Rosenheim, Deutschland

+49 8031 805 26 87
markus.wirnsberger@th-rosenheim.de

AUFTAKT
Anders Bauen – NEUE ANSÄTZE

Neue Freiheit für einfacheres Bauen – Der neue Gebäudetyp-e

Florian Dilg
Task Force Gebäudetyp - e
Bundesarchitektenkammer
Architektur: Zwingel / Dilg
München, Deutschland



Neue Freiheit für einfacheres Bauen – Der neue Gebäudetyp-e

1. Die Zielvorstellung

Einem Projektteam aus Bauherr.innen und Planenden soll es möglich sein, einvernehmlich Standards zu vereinbaren, welche die öffentlich-rechtlichen Sicherheitsbelange respektieren und die entstandenen Räume unter völlig transparenter Darlegung der erstellten Qualität an Dritte zu vermieten oder zu veräußern, ohne haftungsrechtlich in Gefahr zu geraten. Dafür legen sie zusammen fest, welche Anforderungen an das gemeinsame Bauvorhaben wirklich wichtig sind und an welchen Stellen bewusst Abweichungen von geltenden Vorschriften sinnvoll sind. Dies erlaubt einerseits eine kostengünstigere, schnellere und technisch einfachere Ausführung bewährter Bauweisen, andererseits ermöglicht es die Umsetzung innovativer Ideen, die in den Normen noch nicht abgebildet sind.

2. Die Situation

Das Planen und Bauen findet in einem engen Geflecht aus höchsten Ansprüchen statt. In Normen und Richtlinien formuliert bestimmen diese zum großen Teil die technische Umsetzung von Gebäuden, aber auch deren Dimensionen und Ausstattungsstandards.

Bauherr.innen und Planer.innen bestimmen nur noch in einem eng gesteckten Rahmen, mit welchen Schwerpunkten und Qualitäten sie ihr Projekt entwickeln. Und sie entscheiden auch nur eingeschränkt darüber wie die Ziele konstruktiv erreicht und ausgeführt werden.

Die Verschärfung der Normen wird zum einen durch die Baustoffindustrie befördert. Offensichtlich dienen sie mittlerweile als Instrument zur Marktabschottung und der Vermeidung von konkurrierendem Wettbewerb, welche auch die mittelständischen Handwerker in der Bewerbung um Aufträge einschränkt.

Zum anderen entwickeln Fachleute die Richtlinien ohne böse Absicht soweit, daß ihre speziellen fachlichen Belange möglichst ideal erfüllt werden. Das ausgegebene Ziel der Normung ist es, den Stand des technisch Möglichen abzubilden und beurteilt nicht, was für die gestellte Aufgabe das technisch Notwendige ist. Es entstehen dadurch Anforderungen, die teilweise kaum noch konstruktiv auf einer Baustelle hergestellt werden können.

Beim Arbeiten im Bestand werden Projekte durch die Unmöglichkeit der Einhaltung von Normen auch verhindert oder führen zum Abbruch bestehender Substanz. Architekt.innen und Ingenieur.innen haben kaum Spielräume vereinfachend und im Sinne der Suffizienz innovativ zu planen.

Wesentlich wäre also eine intensive Beschäftigung mit dem, was wirklich notwendig ist, und die Anpassung der Anforderungen nach unten.

Dieser Gedanke ist nicht neu. Der Abschlussbericht der Baukostensenkungskommission aus dem Jahr 1994 mit dem Titel «Kostensenkung und Verringerung von Vorschriften im Wohnungsbau» zählt 650 – 700 relevante Regelwerke auf. Die gleichnamige Kommission von 2015 beklagt die Fülle von 3'300 Regelwerken. Bis heute ist deren Zahl weiter angewachsen. Die Arbeit der Kommissionen war damit jeweils erfolglos.

Tatsächlich sind die Richtlinien für die Ausführung von Konstruktionen nicht das Ergebnis einer Suche nach den einfachsten und für die jeweiligen Projekte passendsten Lösungen. Vielmehr geht es der Industrie darum, ganze Themenbereiche mit eigenen Produkten abzudecken und Regeln zu etablieren, die deren Einsatz unverzichtbar machen.

Bedenkenanmeldungen an individuell entwickelten Details sind an der Tagesordnung, denn eigene Ideen passen nicht in die Produktvermarktung von Putzsystemen, Fassadensystemen, Dachsystemen und so weiter. Planende werden dahin gelenkt möglichst

Systemkomponenten miteinander zu kombinieren, die durch Zertifizierungen und Normungen alternativlos erscheinen. Ein wesentlicher Teil unseres Berufsbildes, das Innovationsvermögen, geht dadurch verloren. Beim einfachen Bauen, das zukünftig auch immer mehr im Bestand stattfinden wird, sind wir aber darauf angewiesen, immer wieder passende Lösungen für unvorhergesehene Situationen zu entwickeln.

Die Argumentation, Bauen sei heute so kompliziert, dass es nur durch eine spezialisierte Industrie gelöst werde könne, wurde über Jahre aufgebaut. Die Prinzipien der Bauphysik und die Grundbedürfnisse der Menschen sind aber im Prinzip gleichgeblieben. Die Anspruchshaltung an Gebäude und das Sicherheitsbedürfnis wurden – auch aus wirtschaftlichen Gründen – künstlich gesteigert.

Für diese Problemlage wollen wir einen Ausweg schaffen.

3. Das Konzept Gebäudetyp-e

Beim Planen und Bauen sind wir über zwei Rechtswege an die Regelwerke gebunden. Zum einen über die öffentlich-rechtlichen Anforderungen aus den Bauordnungen, zum anderen privatrechtlich über die geschuldete Mangelfreiheit des Werks nach BGB. Das Konzept des Gebäudetyp-**e** muß also an beiden Stellen ansetzen, um wirksam zu sein.

Für die **Bauordnung** ist der Gedanke folgender:

Neben dem bestehenden System der Gebäudeklassen können Bauvorhaben zum Projektbeginn dem Gebäudetyp-**e**, im Sinne von «Einfach Bauen» oder «Experimentelles Bauen» zugeordnet werden.

Für diese Projekte sollen die Normen und Richtlinien, auf die § 85a Musterbauordnung (MBO) verweist, nicht zwingend gelten. Grundsätzlich gelten die Schutzziele der Bauordnungen, § 3 und genauer in §12-15, wie Standsicherheit, Brandschutz, gesunde Lebensverhältnisse und Umweltschutz.

Als Grund für die Einordnung in «**e**» kann die Anwendung einer vereinfachten Konstruktion ebenso gelten wie der Versuch bezahlbaren Wohnraum zu schaffen oder die Umnutzung einer bestehenden Baustruktur für neue Anforderungen.

Am Beginn eines «**e**»-Projekts steht eine sorgfältige, gemeinsame Festlegung zwischen Planer.innen und Bauherr.innen zu den Zielen und Qualitäten, die frei von Normen vereinbart werden, sich aber daran orientieren können. Im Verlauf der Ausarbeitung bis zur Genehmigung werden diese Festlegungen sicher präzisiert, ergänzt und der Projektentwicklung angepasst.

Die entstandene Aufstellung macht die Eigenschaften des Gebäudes dauerhaft transparent. Durch eine sichtbare Kennzeichnung der neuen Gebäudetypen-**e** wird den Verbrauchern angezeigt, dass es sich um ein Gebäude mit reduzierter Einhaltung von Normen handelt.

Im **BGB** sind Anpassungen notwendig, um den Zwang durch die Haftung zu aufzuheben:

Neben den Planerverträgern soll auch die Rechtsprechung nicht mehr davon ausgehen, dass die Einhaltung aller allgemein anerkannten Regel der Technik geschuldet ist. Der Schluß, dass die Nichteinhaltung einen Sachmangel begründet muß entfallen, wenn die Konstruktion bei ordnungsgemäßer Instandhaltung für den Anwendungszweck tauglich ist und die öffentlich rechtlichen Anforderungen erfüllt.

Dies löst die privatrechtlichen Ansprüche auf die genormten Standards und gibt den Bauherr.innen freie Hand. Ein Mangel entsteht nicht mehr wie heute, allein durch den Widerspruch zu einer Richtlinie.
Um den Verbraucherschutz nicht zu schwächen, soll das Arbeiten mit dem Gebäudetyp-**e** zunächst für sachkundige Bauherr.innen, wie z.B. kommunale Wohnungsbaugesellschaften ermöglicht werden.

Dann ist es möglich mit einem stark reduzierten Regelwerk zur arbeiten, das es Bauherr.innen und und Planenden ermöglicht, Standards, Materialien und Ausführungsdetails aufeinander anzupassen, sodass angemessene und nachhaltige Gebäude zu bezahlbaren Kosten entstehen. Zur Nachhaltigkeit gehört neben der gemeinsamen Zielbestimmung auch eine gute Gestaltung und Abstimmung auf die Nutzerbedürfnisse.

Dadurch verändern wir nichts am System der Regelwerke oder fangen an, einzelne Normen zu verändern. Wir eröffnen nur einen zusätzlichen Planungsweg, der in einen neuen Raum von Möglichkeiten führt.

Die gebauten Beispiele, die in diesem neuen Freiraum entstehen können bewertet werden und Ihre erfolgreichen Innovationen an Folgeprojekte weitergeben. So hoffen wir auf eine Änderung durch reale Erfahrung anstatt durch neue Regelungen.
Das Bayerische Bauministerium hat dafür im letzten Herbst ein Programm mit 18 Pilotprojekten mit verschiedenen Nutzungen und Bauherrenkonstellationen gestartet

4. Was wir gewinnen können

Mehr Freiheit für innovatives und ressourcenschonendes Bauen

Bauherr.innen erhalten mehr Entscheidungsfreiheit über Ihre Projekte, wenn sie neue Wege im Bauen beschreiten wollen. Sie bekommen die Möglichkeiten normenreduziert und damit kostengünstiger zu bauen. Die Entbindung von vielen Richtlinien kompensieren sie durch die Unterstützung von Architekt.innen und durch Fachingenieur.innen, die mit ihrer Kompetenz die Grundregeln des Bauens beachten.

Ideen zur Erneuerung im Bauen bleiben nicht nur Theorien, die diskursiv gegen den Normenapparat bestehen müssen, sondern sie können real erprobt, erlebt und bewertet werden. Wir rechnen mit vielen guten Beispielen, die in die unterschiedlichsten Richtungen Anstöße zur Weiterentwicklung geben. Die Umnutzung von Gebäuden wird einfacher möglich, da der Wechsel der nutzungsspezifischen Anforderungen kein Hindernis mehr sein muss.

Notwendige Neuausrichtungen im Bauwesen, wie verstärkte Umnutzungen unter Wiederverwendung des Bestandes und das zirkuläre Bauen können sich ohne Konflikt mit den bestehenden Standards entwickeln. Der Bestand kann als wertvolle Resource genutzt werden, da die wiederverwendeten Bauelemente ihren Wert außerhalb der Normen haben.

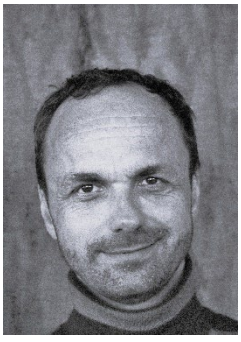
Das Verlassen der engen Normen-Geleise ist eine der Grundlagen für die Entwicklung einer klimaschonenden Umbaukultur. Denn hier geht es ja vor allem um die Freiheit intelligentes Planen und Entwerfen mit passgenauen Konstruktionen zu entwickeln, von denen das WIE zwangsläufig zu Neuerungen führen muß, da es oft keine Standardlösungen gibt und eine möglichst umfangreiche Wiederverwendung vorhandener Baustoffe dies nötig macht.

Architekt.innen und Ingenieur.innen können kreativer ihre Kompetenz zur Konstruktion in die Bauentwicklung einbringen und Verantwortung in der Entwicklung der Gesellschaft übernehmen.
Durch einen leichteren Zugang zu einfacheren Konstruktionen ohne spezielle Zertifikate kann der Gebäudetyp-**e** auch für die kleinen und mittelständischen Handwerksbetriebe den Markt beleben.

AKUSTIK
Schallschutz – neues bei den Werkzeugen und Anforderungen

Lignum-Dokumentation Schallschutz im Holzbau – Grundlagen, Planung und konstruktive Umsetzung

Bernhard Furrer
Lignum Holzwirtschaft Schweiz
Zürich, Schweiz



Lignum-Dokumentation Schallschutz im Holzbau – Grundlagen, Planung und konstruktive Umsetzung

1. Einleitung

Ziel von Schallschutzmassnahmen ist, akustische Einflüsse zu minimieren, welche Menschen in einer gegebenen Situation – beispielsweise in der Wohnung oder am Arbeitsplatz – als störend oder gar belastend empfinden. Im Hochbau geht es dabei um Luftschalldämmung gegen Innen- und Aussengeräusche, um Trittschall- und Körperschalldämmung sowie um die Schallabsorption (Raumakustik).

Zeitgemäss konstruierte Holzbauten schützen die Bewohner effizient vor unerwünschten Lärmeinwirkungen. Im Holzbau können mit mehrschaligen Konstruktionen gegenüber massiven Bauteilen gleich hohe Schalldämmwerte bei wesentlich geringerer Masse erreicht werden. Damit ein schalltechnisch einwandfreies Gebäude entsteht, sind verschiedene bauakustisch relevante Einflussfaktoren zu beachten. Die Publikation zeigt, wie Holzgebäude schall- und holzbautechnisch optimal geplant und umgesetzt werden können.

Die Lignum-Dokumentation berücksichtigt die neuesten Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung. Sie behandelt wichtige Grundlagen der Bauakustik und die wichtigsten Prinzipien der Schallübertragung von Bauteilen. Beispiele und Parameterstudien verdeutlichen den Einfluss unterschiedlicher Schichtaufbauten und der Materialwahl auf die Schalldämmung. Die Dokumentation zeigt geeignete konstruktive Massnahmen für akustisch einwandfreie Holzdeckenkonstruktionen unter Berücksichtigung der für die subjektive Wahrnehmung tiefen Frequenzen auf.

Die Publikation erläutert die grundlegenden Mechanismen und Prinzipien der Flankenübertragung, beschreibt die unterschiedlichen Übertragungswege für Luft- und Trittschall und schält die Relevanz einzelner Übertragungswege für die Schalldämmung zwischen den Räumen heraus. Verschiedene konstruktive Massnahmen an Wand- und Deckenkonstruktionen sowie deren Anschlüsse und Verbindungen werden dargestellt und ihre Wirkung quantifiziert.

Bewährte Lösungen mit detaillierten Angaben zu Bauteilaufbauten und Anschlussverbindungen für verschiedene Holz-Deckenkonstruktionen in Kombination mit Holz-Ständerwänden und Massivholzwänden zeigen, wie sich die im Wohnungsbau geforderten Schallschutzanforderungen erfüllen lassen. Zudem bietet die Publikation Hilfestellungen, um eine fachgerechte Bauausführung zu gewährleisten und schalltechnische Fehler zu vermeiden.

Die Dokumentation erläutert den Schallschutznachweis nach SIA 181 sowie nach EN 12354, behandelt die wichtigsten Eingangsgrössen für die Prognose und führt die erforderlichen Nachweisschritte für Holzbaukonstruktionen anhand von Rechenbeispielen. Praxisbeispiele mit Projektbeschrieb und detaillierten Angaben zur konstruktiven Umsetzung runden die Dokumentation ab. Sie belegen die schallschutztechnische Leistungsfähigkeit zeitgemässer Holzbauten.



Inhalt:

- Wahrnehmung von Schall
- Schallschutzkonzept
- Schalltechnisches Verhalten von Bauteilen
- Konstruktive Massnahmen bei Deckenkonstruktionen
- Nebenwegübertragung – Grundlagen
- Flankenübertragung – Auslegung und konstruktive Massnahmen
- Bewährte Konstruktionen
- Bautechnische Ausführung
- Nachweise
- Dokumentation realisierter Objekte

Abbildung 1: Inhaltsverzeichnis Lignum Publikation Schallschutz im Holzbau – Grundlagen, Planung und konstruktive Umsetzung

2. Schallschutzplanung

Damit ein schalltechnisch einwandfreies Gebäude entsteht, sind die bauakustisch relevanten Einflussfaktoren während aller Projektphasen zu beachten. Von der Abstimmung der Schallschutzanforderungen auf die Benutzerbedürfnisse über das Schallschutzkonzept und die Konstruktionsplanung bis hin zu Bauausführung sind die erforderlichen Schallschutzmassnahmen mit sämtlichen Projektbeteiligten abzustimmen. Bewährte Massnahmen bei der Planung und Umsetzung des Schallschutzes sind in der Lignum-Dokumentation «Schallschutz im Holzbau – Grundlagen, Planung und konstruktive Umsetzung» festgehalten [1].

2.1. Schallschutzanforderungen

Basierend auf dem Umweltschutzgesetz (USG) regelt die eidgenössische Lärmschutzverordnung (LSV) den Schutz vor schädlichem und lästigem Lärm und verlangt, dass der Schallschutz den anerkannten Regeln der Baukunst entspricht. Als Massstab für den Stand der Technik verweist die LSV auf die Norm SIA 181 «Schallschutz im Hochbau» [2].
Die Norm SIA 181 «Schallschutz im Hochbau» gilt für den baulichen Schallschutz gegenüber externen und internen Lärmquellen bei Neubauten sowie bei Umbauten und Umnutzungen. Der Schallschutz gegenüber internen Lärmquellen wird in der Norm zwischen Nutzungseinheiten geregelt. Die Anforderungen sind in Abhängigkeit der Raumart und Raumnutzung und deren Lärmempfindlichkeit sowie in Lärmbelastungsstufen für unterschiedliche Anforderungsstufen festgelegt.

2.2. Wahrnehmung von (Tritt)Schall

In der Schweiz wurden umfangreiche Befragungen der Bewohner von zeitgemässen Mehrfamilienhäusern in Holzbauweise durchgeführt. Wie die Ergebnisse zeigen, schützen Holzkonstruktionen die Bewohner effizient vor unerwünschten Lärmeinwirkungen. Die Bauakustik wurde in diesen Gebäuden insgesamt sehr zufriedenstellend gelöst; die Bewertungen bezüglich der Belästigung durch Geräusche sind relativ niedrig. Das am meisten störende Geräusch bei in Holzbauweise errichteten Gebäuden ist die Trittschallübertragung aus fremden Wohnbereichen. Nach Trittschallgeräuschen waren Verkehrsgeräusche die am meisten störenden Geräusche.

Wie die Ergebnisse der Bewohnerbefragung gezeigt haben, stellen Gehgeräusche bezüglich ihrer Störwirkung die wichtigste Schallquelle in Wohnungen dar. Diese in Gebäuden üblichen Schallemissionen sind sehr tieffrequent und haben ihre wesentlichen Schallanteile unterhalb 100 Hz.

Damit die grosse Mehrheit der Bewohnerinnen und Bewohner zufrieden ist, sind bei der Mess- und Bewertungsmethode die tieffrequenten Anteile von Trittschallgeräuschen zu berücksichtigen. Für die subjektiven Bewertung von Gehgeräuschen mit dem Norm-Trittschallpegel hat sich als beste Bewertungsgrösse $L'_{nT,w} + C_{I,50\text{-}2500}$ herausgestellt. Abgeleitet aus der Anzahl belästigter Personen können Zielgrössen hergeleitet werden. In Abbildung 2 werden Anforderungswerte in drei Qualitätsstufen vorgeschlagen.

Bewertung für Standard-Trittschallpegel (Norm-Hammerwerk)	Vorschlag Anforderungswert (Zielwert) für Prozentsatz von belästigten Personen in dB (Wert ± Konfidenzintervall für 95%)		
	≤ 40%	≤ 20%	≤ 0%*
$L'_{nT,w} + C_{I,\ 50\text{-}2500}$	58 (57,8 ±1,5)	53 (53,5 ± 1,6)	49 (49,3 ± 2,5)
* Wert aus Extrapolation der linearen Regression, in der Praxis liegt der Wert etwas über 0% belästigter Personen.			

Abbildung 2: Vorschläge für Anforderungswerte in drei Stufen für das Norm-Hammerwerk an $L'_{nT,w} + C_{I,50\text{-}2500}$, abgeleitet aus dem prozentualen Anteil belästigter Personen [3, 4]

3. Konstruktive Massnahmen

3.1. Konstruktive Massnahme bei Deckenkonstruktionen

Der Holzbau erreicht seine guten Schalldämmwerte vorrangig durch intelligente Bauteilschichtungen. Dazu ist es von Bedeutung, bei der Konstruktion von Holzdecken die einzelnen Systeme wie Tragkonstruktion, Bodenaufbau und Unterdecke aufeinander abzustimmen. Hilfreich dafür ist das Verständnis der bauphysikalischen Gesetzmässigkeiten, welche in der Lignum-Dokumentation ‹Schallschutz im Holzbau – Grundlagen, Planung und konstruktive Umsetzung› [1] behandelt werden.

Holzdeckenkonstruktionen müssen so geplant werden, dass die für die subjektive Wahrnehmung wesentlichen Schallanteile von Gehgeräuschen optimal gedämmt werden (siehe Kap. 2). Für die optimale Schalldämmung dieser tieffrequenten Geräusche ist bei den Norm-Trittschallpegeln der Frequenzbereich ab 50 Hz zu berücksichtigen. Für tieftonoptimierte Holzdeckenkonstruktionen müssen verschiedene Parameter innerhalb der Konstruktion aufeinander abgestimmt sein. Dabei ist es wesentlich, die Resonanzfrequenz zwischen Bodenaufbau und Tragkonstruktion und/oder zwischen der Tragkonstruktion und einer allfälligen Unterdecke möglichst tief zu planen. Deckenaufbauten mit einer Resonanzfrequenz im bauakustisch relevanten Bereich sind zu vermeiden. Zudem sollten die Bauteilaufbauten so ausgelegt werden, dass sich die einzelnen Schichten der Decke infolge von Mehrfachresonanzen schalltechnisch nicht negativ beeinflussen.

Erfahrungsgemäss kann man im Holzbau mit verhältnismässig einfachen Massnahmen bereits sehr gute Luftschalldämmwerte erreichen. Holzdecken mit ausreichender Trittschalldämmung weisen in der Regel eine genügend hohe Luftschalldämmung auf. Folglich kann man sich bei der Planung von Holzdeckenkonstruktionen auf die Optimierung der Trittschalldämmung konzentrieren. Deckenkonstruktionen im Holzbau, welche den Trittschallschutz auch in den tiefen Frequenzen erfüllen, erreichen praktisch immer einen guten Luftschallschutz. Vorsichtig zu beurteilen beim Luftschallschutz sind hingegen vor allem die Nebenwegübertragungen von mittel- bis hochfrequentem Schall bei einfach beplankten Holzständerwänden, bei relativ biegesteifen und leichten Massivholzwänden oder bei Backsteinwänden (z.B. bei Altbauten). In der Publikation ‹Schallschutz im Holzbau – Grundlagen, Planung und konstruktive Umsetzung› [1] werden wichtige Einflussfaktoren und geeignete konstruktive Massnahmen für akustisch einwandfreie Holzbaudecken beschrieben.

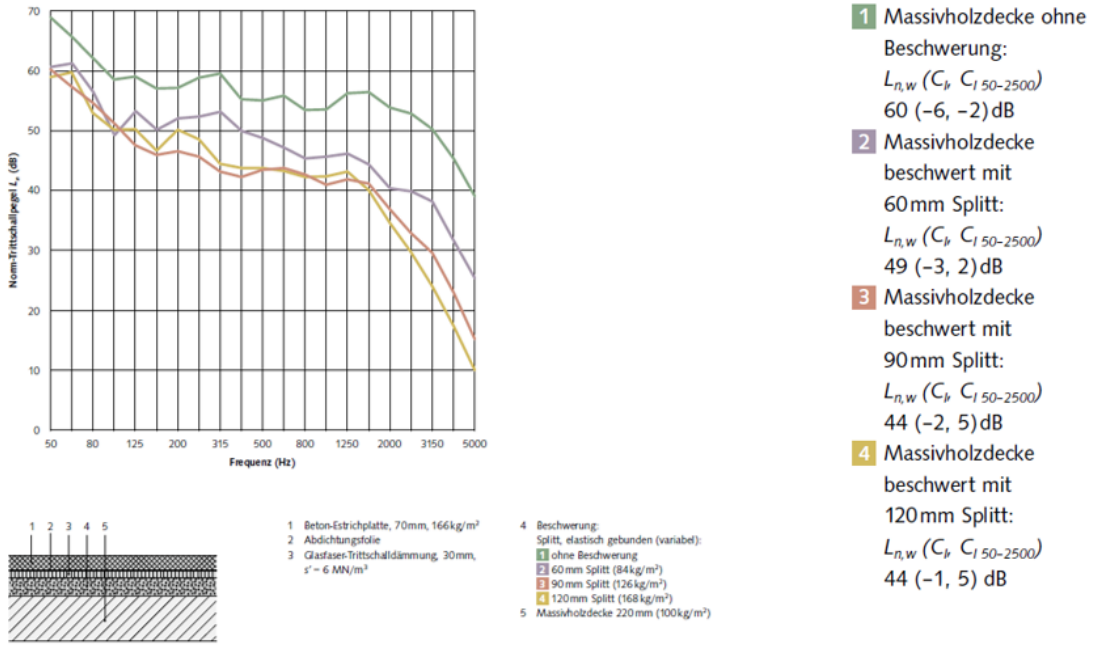


Abbildung 3: Norm-Trittschallpegel L_n mit unterschiedlicher flächenbezogener Masse der Rohdeckenbeschwerung auf einer Massivholzdecke mit identischem Bodenaufbau

3.2. Einfluss Nebenwege

Die Relevanz der einzelnen Übertragungswege für die Schalldämmung zwischen den Räumen ist abhängig von den Wand- und Deckenkonstruktionen sowie deren Anschlüssen und Verbindungen. Von primärem Interesse ist die vertikale Schallübertragung zwischen übereinanderliegenden Räumen. Die Flankenübertragung ist für die Luft- und Trittschallanregung relevant. Die Art der Anregung entscheidet jedoch über die Art und Anzahl der Nebenwege, die betrachtet werden müssen (siehe Abbildung 4).

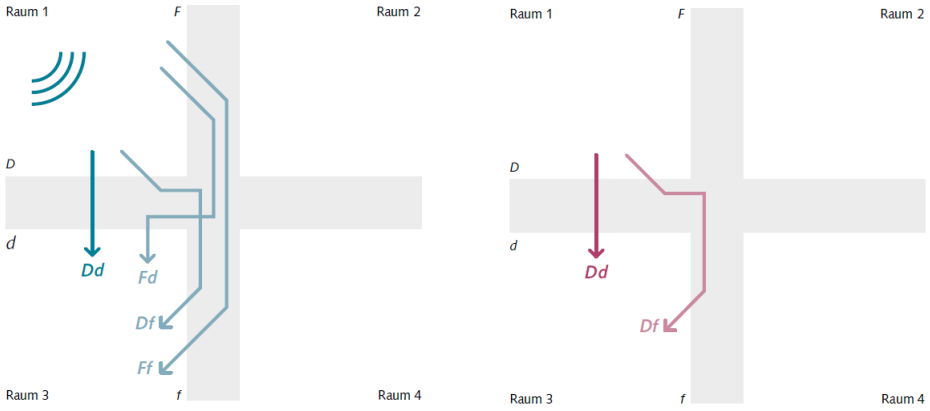


Abbildung 4: Flankenübertragungswege an einer Bauteilverbindung (X-Stoss) mit übereinander liegenden Räumen: Luftschall- (links) und Trittschallübertragung (rechts)

Bei tiefen Frequenzen unterhalb von 100 Hz ist die Luft- und Trittschalldämmung zwischen zwei übereinanderliegenden Räumen fast ausnahmslos durch die Direktübertragung durch die Trenndecke selbst bestimmt. Flankenübertragung spielt in diesem für die Wahrnehmung des Trittschalls wichtigen Frequenzbereich eine untergeordnete Rolle. Dies kommt durch die Einbrüche der Direktschalldämmung bei den Eigenschwingungen der Decke zustande sowie durch die Resonanzen bei Aufbauten mit mehreren voneinander entkoppelten Schichten, wie zum Beispiel Bodenaufbauten und Unterdecken. Durch den starken Anstieg der Luft- und Trittschalldämmung des Trennbauteils oberhalb dieser Resonanzen kann ab einer Frequenz oberhalb von 100 Hz die Flankenübertragung aufgrund des flacheren Verlaufs der Schalldämmspektren und Norm-Trittschallpegel-Spektren die Schwachstelle darstellen.

Ein gut schalldämmender Fussbodenaufbau ist die effektivste konstruktive Massnahme zur Verbesserung der Trittschalldämmung, da damit neben der Direktübertragung auf dem Weg *Dd* auch die Schalldämmung des Flankenwegs *Df* an allen vier Bauteilverbindungen verbessert wird. Somit kann man die Trittschallübertragung aller Übertragungswege gleichzeitig mit nur einer einzigen Massnahme verringern. Bedingung ist jedoch eine korrekte Entkoppelung des Fussbodenaufbaus an den flankierenden Wänden.

Als Massnahme an der Bauteilverbindung eignet sich der Einbau eines elastischen Deckenlagers. Dies ist jedoch nur im Massivholzbau (mit sichtbaren Oberflächen) sinnvoll, da bisherige Untersuchungen und die Praxis gezeigt haben, dass das elastische Zwischenlager nur funktioniert, wenn es zwischen ausreichend steifen Bauteilen eingebaut wird. Zur Verbesserung des Wegs Df muss das elastische Zwischenlager zwischen der unteren Wand und der Decke angeordnet werden. Werden bei den flankierenden Bauteilen Vorsatzschalen eingebaut, sind zusätzliche Massnahmen bei der Bauteilverbindung nicht erforderlich.

Massnahmen an den flankierenden Wänden, zum Beispiel mit der Wahl einer geeigneten Wandvorsatzschale oder Wandbeplankung haben Einfluss auf die Flankenübertragungswege. Diese Massnahme muss jedoch an allen Flankenwänden der vier Bauteilverbindungen vorgesehen werden, die zur Flankenübertragung beitragen. Für den beim Trittschall relevanten Weg *Df* ist die Massnahme nur im unteren Empfangsraum notwendig. Im mehrgeschossigen Holzbau sollte sie jedoch auch im oberen Raum vorgesehen werden, da sich eventuell weitere Geschosse oberhalb befinden. Massnahme an flankierenden Wänden bieten ein doppeltes Verbesserungspotential für die Luftschallnebenwege *Ff* und *Fd*, da sie normalerweise auf allen Stockwerken ausgeführt werden und somit im Sende- wie auch im Empfangsraum wirksam sind.

Flankierende Ständerkonstruktionen sind hinsichtlich der Flankenübertragung tendenziell günstiger als Massivholzwände. Eine sehr effektive Massnahme zur Reduzierung der Nebenwegübertragung bei Ständerkonstruktionen ist die Beschwerung der Wandschalen. Wegen der vergleichsweise geringen flächenbezogenen Masse von üblichen Wandschalen ist eine signifikante Erhöhung der Schalldämmung mit einer zusätzlich angebrachten Beplankung sehr einfach möglich und sehr effizient.

Bei Massivholzwänden erreichen Vorsatzschalen auf einer Holzlattung, welche starr mit der Grundwand verbunden ist, bereits eine gute Verbesserung auch bei einem geringen Schalenabstand von 40 mm von knapp über 10 dB im mittleren und hohen Frequenzbereich, welcher für die Flankenübertragung relevant ist. Somit ist diese Massnahme bereits effektiver als eine direkte Beplankung der Grundwand.

4. Bewährte Konstruktionen

Nachfolgend sind bewährte Lösungen für verschiedene Holz-Deckenkonstruktionen in Kombination mit Holz-Ständerwänden oder Massivholzwänden aufgezeigt, mit denen die Schallschutzanforderungen erfüllt werden können.

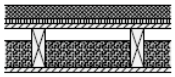
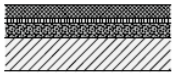
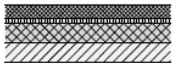
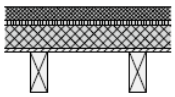
Für die Beurteilung wurden die im Wohnungsbau üblichen Anforderungen gemäss Norm SIA 181 «Schallschutz im Hochbau» [2] herangezogen (mässige Lärmbelastung und mittlere Lärmempfindlichkeit). Zusätzlich wurde der Spektrum-Anpassungswert mit Blick auf die tieffrequenten Anteile von Gehgeräuschen berücksichtigt (siehe Kap. 2.2).

Um die Schallschutzanforderungen einhalten zu können, ist zudem eine korrekte Umsetzung von grösster Bedeutung. Hinweise, damit eine fachgerechte Bauausführung sichergestellt werden kann und schalltechnische Fehler vermieden werden, sind in der Lignum-Dokumentation «Schallschutz im Holzbau – Grundlagen, Planung und konstruktive Umsetzung» festgehalten [1].

Die vorgeschlagenen Massnahmen gelten für im Wohnungsbau übliche Raumgrössen (Raumhöhe mindestens 2,50 m, Grundfläche mindestens 12 m^2). Kleinere Räume verhalten sich wegen des geringeren Raumvolumens schalltechnisch ungünstiger. Allfällige zusätzliche konstruktive Massnahmen müssen im Einzelfall überprüft werden.

Die erforderlichen Massnahmen an den flankierenden Wänden sind abhängig von der Anzahl der für die Schallübertragung massgebenden Verbindungen. Es wird davon ausgegangen, dass jeweils nur die lastabtragenden Wandkonstruktionen zur Gesamtschallübertragung beitragen. Die Flankenschalldämmung der nicht lastabtragenden Wände und deren Verbindung ist für die hier betrachteten Schallschutzniveaus ausreichend hoch, so dass deren Schalllängsleitung vernachlässigt werden kann. Daher werden dort keine weiteren konstruktiven Massnahmen für die vertikale Flankenschalldämmung berücksichtigt.

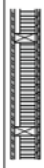
In Abbildung 5 sind bewährte Lösungen für Deckenkonstruktionen aufgezeigt, mit denen die Schallschutzanforderungen in Kombination mit Holzständerwänden sowie Massivholzwänden erfüllt werden können.

Konstruktion	Aufbau	erhöhte Anforderungen $D_{nT,w} + C \geq 56$ dB $L'_{nT,w} + C_I \leq 49$ dB $L'_{nT,w} + C_{I,50\text{–}2500} \leq 49$ dB	Mindestanforderung $D_{nT,w} + C \geq 52$ dB $L'_{nT,w} + C_I \leq 53$ dB $L'_{nT,w} + C_{I,50\text{–}2500} \leq 53$ dB
Hohlkastendecke mit Beschwerung 	Estrich [1]	80 mm Nassestrich; $m' \geq 160$ kg/m²	80 mm Nassestrich; $m' \geq 160$ kg/m²
	Trittschalldämmung [2]	30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m³	30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m³
	Tragschicht	25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m²	25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m²
	Balken/Rippe	240 mm Vollholz	240 mm Vollholz
	Beschwerung [3]	160 mm Splitt; $m' \geq 195$ kg/m²	120 mm Splitt; $m' \geq 146$ kg/m²
	Beplankung	25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m²	25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m²
Massivholzdecke [4] mit Beschwerung 	Estrich [1]	80 mm Nassestrich; $m' \geq 160$ kg/m²	80 mm Nassestrich; $m' \geq 160$ kg/m²
	Trittschalldämmung	30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m³	30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m³
	Beschwerung [5]	90 mm Splitt; $m' \geq 126$ kg/m²	60 mm Splitt; $m' \geq 84$ kg/m²
	Tragkonstruktion [5]	200 mm Vollholz; $m' \geq 90$ kg/m²	200 mm Vollholz; $m' \geq 90$ kg/m²
Holz-Beton-Verbund-Massivholzdecke 	Estrich [1]	80 mm Nassestrich; $m' \geq 160$ kg/m²	60 mm Nassestrich; $m' \geq 120$ kg/m²
	Trittschalldämmung	30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m³	30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m³
	Beschwerung [5]	120 mm Beton; $m' \geq 288$ kg/m²	120 mm Beton; $m' \geq 288$ kg/m²
	Tragkonstruktion [5]	120 mm Massivholz; $m' \geq 54$ kg/m²	120 mm Massivholz; $m' \geq 54$ kg/m²
Holz-Beton-Verbund-Rippendecke 	Estrich [1]	80 mm Nassestrich; $m' \geq 160$ kg/m²	60 mm Nassestrich; $m' \geq 120$ kg/m²
	Trittschalldämmung	30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m³	30 mm Glasfaser-Trittschalldämmung; $s' \leq 6$ MN/m³
	Beschwerung	140 mm Beton; $m' \geq 336$ kg/m²	140 mm Beton; $m' \geq 336$ kg/m²
	Tragschicht	25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m²	25 mm HWS-Platte; $m' \geq 11$ kg/m²
	Balken/Rippe	240 mm Vollholz	240 mm Vollholz

1) Ein flächig verklebter harter oder ein weicher Bodenbelag ist vorgesehen; Estriche mit geschliffenen Oberflächen und schwimmende Fussbodenbeläge sind gesondert zu betrachten (siehe Kap. 5.3). Schwere, biegeweiche Trockenestrichsysteme sind gesondert zu betrachten (siehe Kap. 5.3.1)
2) Bei Leitungsführungen ist zwischen der Rohdecke und der Trittschalldämmung eine Installationsebene auszuführen (siehe Kap. 9.1).
3) Die Beschwerung bzw. ein Teil davon kann auf der Tragschicht angebracht werden.
4) Massivholzdecke aus Brettstapel, Brettschichtholz oder Brettsperrholz
5) Die Summe der flächenbezogenen Masse der Tragkonstruktion und Beschwerung ist massgebend (siehe Kap. 9.2).

Abbildung 5: Bewährte Lösungen für Deckenkonstruktionen

Für die bewährten Deckenkonstruktionen sind in Abbildung 6 geeignete Massnahmen an den flankierenden Holzständerwänden aufgezeigt. Detaillierte konstruktive Massnahme für Holzständerwände sowie Massivholzwände sind in der Lignum-Dokumentation «Schallschutz im Holzbau – Grundlagen, Planung und konstruktive Umsetzung» [1] festgehalten.

Holzständerwand-konstruktion (gemäss Aufbau in Tab. 830-2)	**Wandaufbau 1** (raumseitig direkt beplankt mit OSB/GK) 		**Wandaufbau 2** (raumseitig direkt beplankt mit OSB/GF) 		**Wandaufbau 3** (raumseitig Vorsatzschale mit Lattung/Hohlraum-dämmung und GF) 	
Deckenkonstruktion (gemäss Aufbau in Tab. 810-2)	**Situation A** (max. zwei lastabtragende Wände)	**Situation B** (bis vier lastabtragende Wände)	**Situation A** (max. zwei lastabtragende Wände)	**Situation B** (bis vier lastabtragende Wände)	**Situation A** (max. zwei lastabtragende Wände)	**Situation B** (bis vier lastabtragende Wände)
Hohlkastendecke						
Massivholzdecke						
Holz-Beton-Verbund-Massivholzdecke						
Holz-Beton-Verbund-Rippendecke						

☐ erhöhte Anforderungen erfüllt
Mindestanforderungen erfüllt
Anforderung nicht erfüllt

Abbildung 6: Geeignete Massnahmen an Holzständerwänden in Kombination mit bewährten Deckenkonstruktionen

5. Schalltechnische Kennwerte/Bauteildatenbank

Die Bauteildatenbank der Lignum bildet für zeitgemässe Konstruktionen in Holz die Schall-dämm-Masse für Luftschall (R_w), Trittschall ($L_{n,w}$) sowie die Spektrum-Anpassungswerte (C, C_{tr}, C_I) ab (www.lignumdata.ch).

Auf der Grundlage von umfangreichen Untersuchungen an der Empa werden laufend schalltechnische Kennwerte für die direkte Schallübertragung sowie die Flankenübertragungen entlang relevanter Übertragungswege ermittelt. Diese Daten werden Eingang finden in ein geplantes Prognosetool als Hilfsmittel für den schalltechnischen Nachweis bei Holzbauten.

6. Literaturhinweise

[1] Furrer B., Schoenwald S.: Lignum-Dokumentation Schallschutz im Holzbau – Grundlagen, Planung und konstruktive Umsetzung, Lignum Zürich, 2023

[2] SIA 181:2020 «Schallschutz im Hochbau»

[3] Späh M., Liebl A., Leistner P.: AcuWood – Acoustics in Wooden Buildings – Evaluation of acoustic quality in wooden buildings: Listening tests and questionnaire field study, WoodWisdom-Net, Project Report 3, 2014

[4] Späh M., Liebl A., Leistner P.: AcuWood – Acoustics in Wooden Buildings – Correla-tion analysis of subjective and objective parameters, WoodWisdom-Net, Project Report 4, 2014

Übertragungsfunktionen Einfache Prognose des Lärms bei gebäudetechnischen Anlagen

Fabian Schöpfer
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Übertragungsfunktionen Einfache Prognose des Lärms bei gebäudetechnischen Anlagen

1. Einleitung

Für die Prognose von Installationsgeräuschen bzw. Geräuschen ausgehend von gebäudetechnischen Anlagen besteht aktuell eine Planungslücke in den nationalen Regelwerken zum Schallschutz. So basiert die aktuelle Planungspraxis auf Projekterfahrung oder einer Beurteilung anhand von Messungen in Musterprüfständen. Eine Folge ist ggf. eine Überschreitung der Anforderungswerte an den resultierenden Schalldruckpegel in schutzbedürftigen Räumen oder eine Überdimensionierung in der Planung.

Bei Geräuschen aus gebäudetechnischen Anlagen muss beachtet werden, dass im Gegensatz zu den Anforderungen an die Luft- und Trittschalldämmung die Anforderungen nicht nur an die Schalldämmung von Bauteilen und die Kombination von Übertragungswegen im Gebäude gestellt werden. Vielmehr ist hier die Kombination einer Geräuschquelle mit dem Gebäude und der resultierende absolute Schalldruckpegel bei einem definierten Betriebszustand der Quelle zu betrachten. So sind für die Prognose zusätzlich zu den Eingangsdaten bezüglich der Schalldämmung von Bauteilen bzw. dem Gebäude auch Daten von der Quelle erforderlich. Diese ist als Luft- und Körperschallquelle zu betrachten. Vor allem die Körperschallanregung ist bei Bauteilen in Holzbauweise von besonderem Stellenwert. Hier ist die Anregbarkeit aufgrund der leichten und weniger steifen Bauteile größer und damit ungünstiger. Gleichzeitig ist die Beschreibung der Kopplung zwischen Quelle und Bauteil aufgrund der im Holzbau üblichen, inhomogenen Konstruktionen sehr komplex. In den vergangenen Jahren wurden allerdings auf nationaler und internationaler Ebene Methoden entwickelt, um diese Planungslücke zu schließen. Dabei war und ist das angestrebte Ziel, praxisgerechte Lösungen für diese komplexe Planungsaufgabe zu entwickeln. In diesem Beitrag wird eine vergleichsweise einfache Methode vorgestellt, mit der die Schallübertragung im Gebäude ausgehend von der Köperschallanregung mithilfe von Übertragungsfunktionen beschrieben werden kann. Dies ermöglicht es, die gesamte Übertragung mit einer einzigen Größe zu erfassen. Übertragungsfunktionen können gemessen und katalogisiert für die Planung zur Verfügung gestellt werden.

2. Methodik

In diesem Beitrag wird die Methode zur Prognose der Körperschallübertragung anhand von Übertragungsfunktionen beschrieben. Tatsächlich ist dies nur ein Teil der Gesamtprognose. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt die gesamte Methodik kurzgefasst aufgezeigt. Die Zielgröße bei der Prognose ist der resultierende, A-bewertete Schalldruckpegel in einem Raum. Konkret ist die Anforderung an den normierten, mit der Messzeitkonstante Fast bewerteten Maximalpegel, $L_{\mathrm{AF,max,n}}$ während eines Betriebszyklus gestellt. Der resultierende Schalldruckpegel ist dabei maßgeblich vom betrachteten Betriebszustand der Quelle abhängig. Der Betriebszustand, die Betriebsbedingungen und der betrachtete Betriebszyklus müssen also, sofern es keine Standards gibt, definiert werden.
Für einen so definierten Betriebspunkt der Quelle sind grundsätzlich sowohl Daten für Luft- als auch für Körperschallemission als Eingangsdaten erforderlich. Für die Schallübertragung (Transmission) im Gebäude werden separat Eingangsdaten vom Gebäude benötigt. So ergibt sich je ein resultierender Schalldruckpegel für den Luft- und den Körperschallanteil. Die energetische Summe ist dann der gesamte zu erwartende Schalldruckpegel.
Eingangsdaten für die Emission der Quelle und der Transmission im Gebäude werden zunächst unabhängig voneinander ermittelt. Das ist nötig, um beliebige Quellen mit beliebigen Gebäuden und Einbausituationen kombinieren zu können. Im Folgenden wird zunächst auf die Daten der Quelle und dann auf die Gebäudedaten eingegangen.

2.1. Quelle

Die Daten der Quelle müssen unabhängig von der Einbausituation sein, um sie flexibel anwenden zu können. Die Luftschallemission kann hierbei mit den etablierten Methoden der Normenreihe DIN EN ISO 3740 ff. [1] ermittelt werden. Die betrachtete Größe ist dabei die Luftschallleistung. Diese kann direkt auf die Bausituation übertragen werden.
Für die Körperschallemission ist dies ungleich komplexer, da die übertragene Körperschallleistung stark von der Struktur bzw. dem Bauteil abhängt, an dem die Quelle montiert ist, oder auf dem die Quelle steht. Auch bei der Körperschallemission wird die Leistung als primäre Kenngröße für Prognose herangezogen. Diese kann aber nur zusammen mit Informationen über das angekoppelte Bauteil bestimmt werden.

Mit der DIN EN 15657 [2] stehen zur Bestimmung der Köperschallleistung seit einigen Jahren auch Labormethoden zur Verfügung. Grundsätzlich erfordert die Beschreibung der Kopplung zwischen einer Quelle und einer Empfängerstruktur eine sehr detaillierte, phasenrichtige Betrachtung. Dies umfasst eine genaue Kenntnis des oder der geplanten Ankopplungspunkte auf dem Bauteil. So müssten an jedem Kontaktpunkt alle sechs Freiheitsgrade, inklusive der gegenseitigen Interaktion mit den sechs Freiheitsgraden an allen anderen Kontaktpunkten in Betracht gezogen werden. Diese Detaillierungsgrade sind baupraktisch undenkbar und nur in anderen Industriezweigen mit Serienprodukten wie der Fahrzeugindustrie anwendbar.

Typischerweise werden in der Bauakustik Räume und Bauteile als Energiesubsysteme betrachtet. Dabei wird der Ort der Anregung nicht genauer spezifiziert. Maßgeblich ist lediglich die Leistung, mit der ein Subsystem angeregt wird. Diese Betrachtung findet auch bei den Methoden der DIN EN 15657 Anwendung. Dabei wird anhand von indirekten Messungen an definierten Empfangsbauteilen im Labor, ähnlich dem Hallraumverfahren bei der Luftschallleistungsbestimmung, die Körperschalleistung ermittelt. Ein Vorteil dabei ist, dass so die realen Montagebedingungen realisiert werden können. So wird die Körperschallleistung der Quelle als globaler Wert («single equivalent» [3]) unabhängig von der Anzahl von Kontaktpunkten oder der Montageart beschrieben. Allerdings werden die Ergebnisse nicht als Einzahlwert, sondern als Terzspektrum angegeben. Das ist nötig, da die spektrale Charakteristik sowohl der Luft- als auch der Körperschalleistung von entscheidender Bedeutung ist. Schallquellen aus der Gebäudetechnik weisen häufig durch rotierende Komponenten wie Ventilatoren oder Kompressoren dominierende Emissionen bei bestimmten Frequenzen auf.

Die Eingangsgröße von der Quelle für die Prognose ist also ein Terzspektrum der Luft- und Körperschallleistung für einen definierten Betriebszustand oder -zyklus.

2.2. Gebäude

Ausgehend von der Luftschalleistung in einem Senderaum und der Körperschallleistung an, oder auf einem Sendebauteil ist die Übertragung durch das Gebäude bis zum mittleren Schalldruckpegel in einem Empfangsraum zu berechnen. Hierfür sind in der kürzlich erschienenen überarbeiteten Fassung der DIN EN 12354-5 [4] Methoden beschrieben.

Die Übertragung im Gebäude wird ebenfalls separat für Luft- und Körperschall betrachtet. Für den Luftschallanteil kann die Schallpegeldifferenz zwischen Sende- um Empfangsraum für die Prognose verwendet werden. Die Schallpegeldifferenz kann anhand von Bauteildaten aus dem prognostizierten Bau-Schalldämm-Maß R' abgeleitet werden.

Für die Körperschallübertragung wird der gesamte Übertragungsweg mit allen Flankenwegen von der eingeleiteten Körperschallleistung in ein Bauteil bis zum mittleren Schalldruckpegel in einem Empfangsraum betrachtet. Dies umfasst wie bei der Luftschallübertragung die Schallausbreitung in Bauteilen und über Bauteilestöße hinweg, inklusive der Schallabstrahlung im Empfangsraum. Die Kopplung mit dem Sendebauteil ist dabei aber schon in der Körpschallleistung enthalten.

Die gesamte Übertragung wird mit der Übertragungsfunktion D_{TF} [5] beschrieben. Diese ist als Pegeldifferenz zwischen dem räumlichen Mittel des Schalldruckpegels im Empfangsraum $L_{\mathrm{av},k}$ und der Körpschallleistung $L_{\mathrm{W},k}$ für eine Anregung an einem Punkt k auf dem Sendebauteil definiert [6].

$$D_{\mathrm{TF},k} = L_{\mathrm{av},k} - L_{\mathrm{W},k}$$

Bei Anregung mit einer bekannten Körperschallleistung kann die Übertragungsfunktion gemessen werden. Dabei werden in der Regel mehrere Anregungspunkte k auf dem Sendebauteil betrachtet und für diese eine mittlere Übertragungsfunktion $D_{\mathrm{TF,av}}$ angegeben.

$$D_{\mathrm{TF,av}} = 10\,\lg\left(\frac{\sum_{k=1}^{K} 10^{D_{\mathrm{TF},k}}}{K}\right)$$

Wie beim Norm-Trittschallpegel wird der Pegel im Empfangsraum entweder mit der Bezugsabsorptionsfläche A_0 normiert, oder mit der Bezugsnachhallzeit T_0 standardisiert.

$$D_{\mathrm{TF,av,n}} = D_{\mathrm{TF,av}} + 10\,\lg\frac{A}{A_0} \qquad D_{\mathrm{TF,av,n}T} = D_{\mathrm{TF,av}} - 10\,\lg\frac{T}{T_0}$$

In der DIN EN 12354-5 wird die Körperschallübertragung basierend auf der Übertragungsfunktion D_{TF} als normierter Schalldruckpegel bei 1 Watt Körperschallanregung ($L_{\mathrm{W},0}$ = 120 dB) auf dem Bauteil i beschrieben. Dies kann analog zum Norm-Trittschallpegel gesehen werden, wo auch ein Norm-Schalldruckpegel für eine definierte Anregung, dem Hammerwerk, verwendet wird. Der Zusammenhang zwischen $D_{\mathrm{TF,av,n}}$ und $L'_{\mathrm{n,e,s,0},i}$ ist wie folgt definiert.

$$L'_{\mathrm{n,e,s,0},i} = L_{\mathrm{av,n}} - L_{\mathrm{Ws},i} + L_{\mathrm{W},0} = D_{\mathrm{TF,av,n}} + 120\ \mathrm{dB}$$

Dabei steht der Index «e» für equipment, «s» für structure-borne sound, «0» für die Anregung 1 Watt und «i» für das angeregte Bauteil. In diesem Beitrag werden die Daten als $L'_{\mathrm{n,e,s,0},i}$ dargestellt. Sofern die relevanten Eingangsdaten vorhanden sind, kann die Übertragungsfunktion auch berechnet werden. Ein entsprechendes Verfahren für jeden Flankenübertragungsweg ij ist im Anhang der EN 12354-5 enthalten. Alternativ kann ein Katalog mit gemessenen Übertragungsfunktionen erstellt und in der Prognose eingesetzt werden. Das ist grundsätzlich auch für die Luftschallübertragung denkbar und wird in der EN 12354-5 auch so als Alternative erwähnt.
Mit gemessenen Übertragungsfunktionen können auch Übertragungswege höherer Ordnung, das heißt über mehr als einen Bauteilstoß hinweg abgedeckt werden. Das ist mit einer Berechnung nach den Verfahren der EN 12354 Reihe aktuell nicht möglich.

2.3. Gesamtprognose

Mit dem Luftschalleistungspegel L_{Wa} wird zunächst mit der äquivalenten Schallabsorptionsfläche im Senderaum A_{S} der Schalldruckpegel im Senderaum bestimmt. Mit der Norm-Schallpegeldifferenz D_{n} kann dann der resultierende normierte Schalldruckpegel im Empfangsraum $L'_{\mathrm{n,e,a}}$ berechnet werden.

$$L'_{\mathrm{n,e,a}} = L_{\mathrm{Wa}} - 10\,\lg\frac{A_{\mathrm{S}}}{4} - D_{\mathrm{n}}$$

Dabei steht der Index «a» für airborne sound.
Mit der Körperschallleistung auf dem Bauteil i, $L_{\mathrm{Ws},i}$ kann mit der Übertragungsfunktion $D_{\mathrm{TF,av,n}}$ bzw. dem Norm-Schalldruckpegel für 1 Watt Körperschallanregung $L'_{\mathrm{n,e,s,0},i}$ der resultierende Schalldruckpegel $L'_{\mathrm{n,e,s},i}$ aufgrund der Körperschallemission berechnet werden

$$L'_{\mathrm{n,e,s},i} = L'_{\mathrm{n,e,s,0},i} + L_{\mathrm{Ws},i} - L_{\mathrm{W},0} = D_{\mathrm{TF,av,n}} + L_{\mathrm{Ws},i}$$

Die Summe aus dem Luft- und Körperschallanteil ergibt dann den gesamten resultierenden Schalldruckpegel.

$$L'_{\mathrm{n,e}} = 10\,\lg\left(10^{L'_{\mathrm{n,e,a}}/10} + 10^{L'_{\mathrm{n,e,s},i}/10}\right)$$

Die gesamte Prognoserechnung wird in Terzbändern, also frequenzabhängig durchgeführt. Der resultierende normierte Schalldruckpegel $L'_{\mathrm{n,e}}$ ist also ein Terzbandspektrum. Dieses Spektrum wird dann noch A-Bewertet bevor der Summenpegel als Endresultat gebildet wird.

3. Baumessungen

Für Prognose ist es eine praktikable Methode gemessene, katalogisierte Übertragungsfunktionen zu verwenden. Grundsätzlich ist jede Übertragungssituation von vielen Faktoren abhängig. Dazu gehören unter anderem die Bauteilkonstruktionen der an der Schallübertragung beteiligten Bauteile, die Bauteilstöße, der Übertragungsweg, der Ort der Anregung. Es ist also auf den ersten Blick undenkbar alle möglichen Varianten in einem Bauteilkatalog abzubilden. In früheren Untersuchungen konnte aber schon gezeigt werden, dass Übertragungsfunktionen für ähnliche Situationen sehr ähnliche Werte aufweisen [7] [8] [9].

Darauf aufbauend wurden in mehreren Projekten an der TH Rosenheim umfangreich Übertragungsfunktionen im Rahmen von Baumessungen gesammelt und analysiert. Dabei wurde erstmalig die oben definierte Übertragungsfunktion D_{TF} mit der Körperschallleistung als Eingangsgröße verwendet. So ist eine zu erwartende Streuung der Daten durch die variable Anregbarkeit des angekoppelten Bauteils schon reduziert. Im Rahmen der Messungen wurde nicht nur die Übertragung in direkt angrenzende Räume, sondern auch in weiter entfernte Räume betrachtet. So kann eine Vielzahl von möglichen Kombinationen zwischen dem Ort der Quelle und einem Empfangsraum abgebildet werden. Ergänzend zu Messung der Übertragungsfunktion für die Körperschallanregung wurde in einigen Objekten auch die Norm-Schallpegeldifferenz mitgemessen.

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Daten aufgezeigt, der eine gute Basis bietet aber auch nicht als Endergebnis anzusehen ist. Vielmehr ist es möglich und auch nötig die Datenbasis kontinuierlich zu erweitern.

Die Messungen wurden bisher ausschließlich im Holzbau durchgeführt. Es gibt jedoch auch Daten mit Kombinationen von Bauweisen. Zum Beispiel wurden auch Übertragungswege vom massiven Keller in darüberliegende Geschosse in Holzbauweise betrachtet.

Insgesamt konnten durch die beteiligten Projektpartner und einem Aufruf über die Holzbauverbände bisher Messungen in insgesamt 38 Objekten von 19 verschiedenen Herstellern durchgeführt werden. Darunter sind 12 Mehrfamilienhäuser, 3 Geschosswohnungsbauten, 2 Bürogebäude, 17 Einfamilienhäuser und 4 für die Forschung errichtete Aufbauten, davon 3 in Holzmodulbauweise.

Insgesamt liegen aus den Messungen rund 260 Übertragungsfunktionen vor, die in Abbildung 3 dargestellt sind. Diese Grafik gibt einen Überblick über den Datenbereich der gemessenen Übertragungsfunktionen.

Dabei ist zu beachten, dass hier nicht der übliche bauakustische Frequenzbereich dargestellt ist, sondern der Bereich von 20 Hz bis 2000 Hz. Die Untergrenze wurde tiefer gewählt, da vor allem tiefe Frequenzen bei gebäudetechnische Anlagen häufig maßgebend sind. Damit einher gehen natürlich größere Unsicherheiten. Dennoch wurden die Daten erfasst, ausgewertet und dargestellt, um für diesen Frequenzbereich zumindest orientierend auch eine Prognose zu ermöglichen. Oberhalb von 2000 Hz ist es aus messtechnischer Sicht sehr aufwändig und meist auch gar nicht möglich, belastbare Daten im Rahmen von Körperschallmessungen zu erfassen. Ein Grund ist, dass das Kraftspektrum der Anregung je nach Oberflächenbeschaffenheit deutlich hin zu hohen Frequenzen limitiert ist. Zudem ist die Befestigung von Beschleunigungssensoren bei hohen Frequenzen ein kritischer Aspekt. Hier ist eine sehr steife Verbindung, z.B. durch Sekundenkleber o.Ä. erforderlich was auf einer Baumessung kurz vor Übergabe einer Wohnung meist nicht realisierbar ist. Zudem ist die Masse der Sensoren bei hohen Frequenzen ein limitierender Faktor, vor allem im Holztafel- und Trockenbau mit üblichen Beplankungslagen. Nicht zuletzt ist bei der Messung des Schalldruckes im Empfangsraum ein ausreichender Abstand zum Grundgeräusch hin zu hohen Frequenzen nicht gegeben. Das liegt neben der oben genannten Limitierung in der Anregung vor allem an den spektralen Charakteristik der Übertragung die einen Abfall hin zu hohen Frequenzen aufweist, wie es auch in Abbildung 3 erkennbar ist.

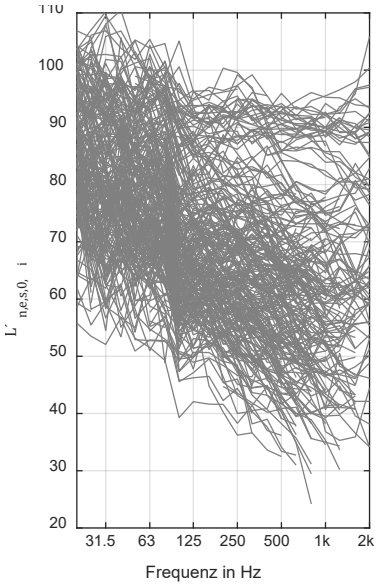


Abbildung 1: Kompletter Datensatz aller rund 260 gemessen Übertragungsfunktionen. Dargestellt als $L'_{\mathrm{n,e,s,0},i}$, also dem Norm-Schalldruckegel bei Anregung mit 1 Watt Körperschalleistung.

Aus den in Abbildung 1 gezeigten Daten können unter der Anwendung verschiedener Parameter Gruppen mit ähnlicher Charakteristik und somit geringer Streuung gefiltert werden. Eine mögliche Gruppe zeichnet sich bereits in Abbildung 3 ab 125 Hz im Bereich von etwa 90-95 dB ab.

3.1. Filterung der Daten

Ziel der Datenfilterung ist es Gruppen mit möglichst geringer Streuung zu erhalten, für die zum Beispiel ein Mittelwert als Planungsdatensatz in einem Katalog abgelegt werden kann. Dabei soll aus praktikablen Gründen die der Detaillierungsgrad und auch die Anzahl der Parameter für die Filterung so gering wie möglich, aber so groß wie nötig sein.
Bei den Messungen wurden unter anderem folgende Parameter erfasst, die zur Filterung herangezogen werden.

- Übertragungsweg, d.h. räumliche Anordnung von angeregtem Bauteil i (Sendebauteil) und Empfangsraum
- Typ des angeregten Bauteils (z.B. Innenwand, Außenwand, Trenndecken, …)
- Wohneinheitentrennung zwischen Sendebauteil und Empfangsraum
- Konstruktion des angeregten Bauteils
- Vorhandensein und Art einer möglichen Vorsatzkonstruktion vor dem Sendebauteil
- Art der Trenndecke bei Übertragungswegen über eine Geschosstrennung hinweg

In Abbildung 2 sind zwei Beispiele für gefilterte Daten dargestellt. In beiden Fällen wurde eine Innenwand (Einfachständerwerk) ohne Vorsatzschale angeregt. Die Übertragung ist jeweils innerhalb einer Wohneinheit. Dabei zeigt die Grafik links Daten für die horizontale, direkte Übertragung in den dahinter liegenden Raum. Zum Beispiel bei einem Technikraum im Erdgeschoss mit wandhängendem Gerät und angrenzendem Büro oder Wohnzimmer. In der Grafik rechts sind Daten für die vertikale Übertragung über die Trenndecke (hier eine Holzbalkendecke) hinweg dargestellt. Dies wäre in dem oben genannten Beispiel die Übertragung in ein Kinder- oder Schlafzimmer im Obergeschoss direkt über dem Technikraum im Erdgeschoss.

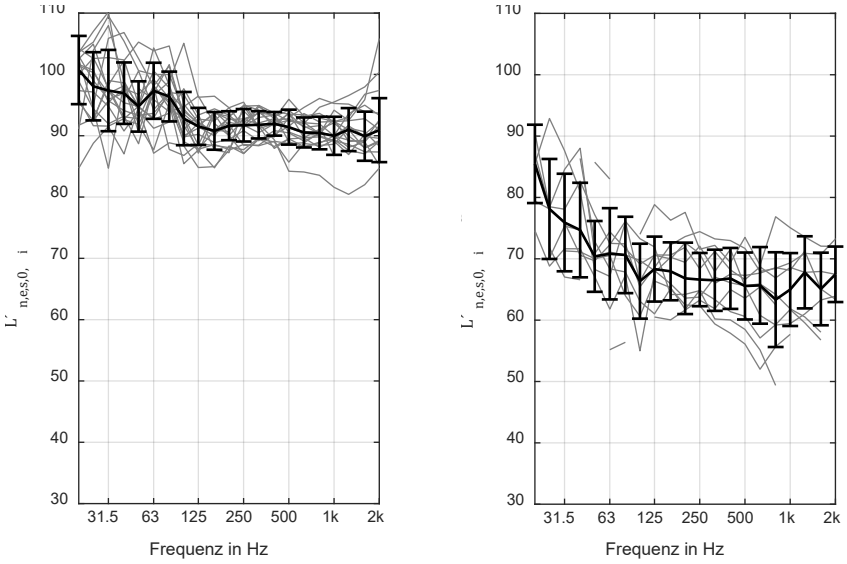


Abbildung 2: Beispiele für gefilterte Datensätze der gemessenen Übertragungsfunktionen, dargestellt als $L'_{\mathrm{n,e,s,0,}i}$. Jeweils mit Anregung einer Einfachständerwand ohne Vorsatzschale für zwei Übertragungswege. Alle vorhandenen Daten in grau und der Median mit Standardabweichung in schwarz. Links: horizontal direkt (n=20), rechts: vertikal, Trenndecke als Holzbalkendecke (n=10).

In der Abbildung sind alle bereits vorhandenen Datensätze in grau dargestellt, welche die jeweiligen Filterkriterien erfüllen. Zu beachten ist, dass bei den Terzbändern unter 50 Hz die Werte nicht auf die äquivalente Schallabsorptionsfläche normiert sind, da in diesem Frequenzbereich die Messung der Nachhallzeit nicht immer möglich ist. In schwarz ist der Median mit Standardabweichung dargestellt. Dabei wurde bewusst der Median anstatt des Mittelwertes gewählt, da dieser bei geringer Stichprobengröße robuster in Bezug auf Ausreißer ist [10]. Dabei zeigt sich für beide Gruppen eine klare spektrale Charakteristik mit einer Standardabweichung von ca. 2 dB – 8 dB. Es ist zu sehen, dass die horizontale Übertragung eine flache Charakteristik aufweist und etwa 20-25 dB über den Werten der vertikalen Übertragung liegt. Wobei die Differenzen zwischen den beiden Gruppen bei tiefen Frequenzen wesentlich geringer sind.

3.2. Ergebnisse der Luftschallmessungen

Im Rahmen der Baumessungen wurden auch Messungen der Luftschalldämmung in Form der (Norm-) Schallpegeldifferenz zwischen dem Sende- und Empfangsraum gemessen. Diese Daten werden benötigt, um einen möglichen Luftschallnebenweg bei der Körperschallmessung zu korrigieren. Sie werden aber zusätzlich für die Prognose des Luftschallanteils mit abgelegt.
In Abbildung 3 sind die Norm-Schallpegeldifferenzen die Übertragungssituationen aus Abbildung 2 dargestellt. Auch hier sind alle vorhandenen Daten in grau und der Median mit Standardabweichung in schwarz dargestellt. Für die vertikale Übertragung zeigt sich ein deutlicherer Anstieg der Schallpegeldifferenz mit der Frequenz. Allerdings sind die Differenzen zwischen der horizontalen und vertikalen Übertragung geringer als bei der Körperschallübertragung. Auch sind einzelne Ausreißer zu erkennen, die mitunter auf eine Nebenwegsübertragung über Zimmertüren und Flure erklärt werden kann. Trotz möglicher Nebenwege ist die Streuung vergleichsweise gering, zumal auch hier wie bei der Körperschallübertragungsfunktion keine differenzierte Filterung in Bezug auf Konstruktionsdetails durchgeführt wurde.

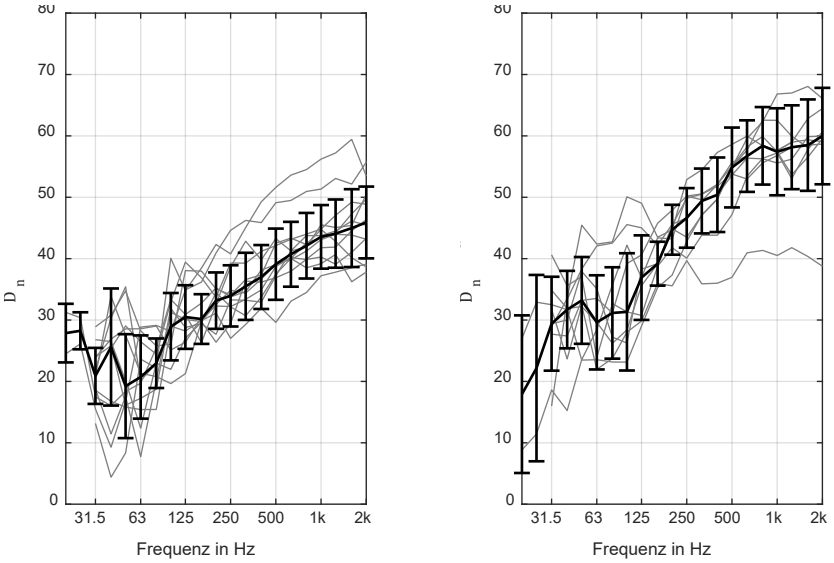


Abbildung 3: Beispiele für gefilterte Datensätze der Norm-Schallpegeldifferenz. Alle vorhandenen Daten in grau und der Median mit Standardabweichung in schwarz. Links: horizontal direkt (n=12), rechts: vertikal, Trenndecke als Holzbalkendecke (n=9).

4. Beispiel

Mit den oben gezeigten Daten für die Körper- und Luftschallübertragung wird nun ein Beispiel für eine gesamte Prognose gezeigt. Dabei werden Körper- und Luftschalldaten einer fiktiven Quelle verwendet, die jedoch von Messungen an realen Geräten abgeleitet sind. Abbildung 4 zeigt die Körper- und Luftschallleistungspegel der betrachteten Quelle. Für die Körperschallleistung wurde entsprechend den Daten aus Abbildung 2 berücksichtigt, dass das Gerät wandhängend an einer Einfachständerwand befestigt ist. Für die gleiche Quelle an einer schwereren, steiferen Wand wäre mit einem geringeren Körperschallleistungspegel zu rechnen.

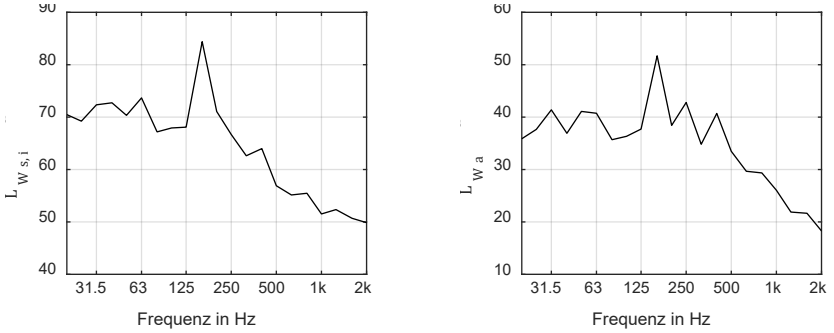


Abbildung 4: Körperschalleistungspegel $L_{\mathrm{Ws},i}$ und Luftschallleistungspegel L_{Wa} einer fiktiven wandhängenden Quelle. Körperschallleistungspegel für ein Einfachständerwerk als Empfangsbauteil, i.

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, kann ausgehend von den Terzspektren der Körper- und Luftschallleistung zusammen mit der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion bzw. der Norm-Schallpegeldifferenz je ein Terzspektrum des resultierenden Schalldruckpegels berechnet werden. In diesem Beispiel wurde der Median aus Abbildung 2 und Abbildung 3 verwendet. Für den Senderaum wurde ein Nachhallzeit von 0,6 s und ein Raumvolumen von 35 m³ angesetzt.

Die energetische Summe des Schalldruckpegels für die Körper- und Luftschallübertragung ergibt dann den gesamten resultierenden Schalldruckpegel. Die Schalldruckpegel werden dann noch A-bewertet und können zum Summenpegel aufsummiert werden. Vor allem im Abgleich mit Messungen des A-bewerteten Summenpegels auf der Baustelle ist allerdings zu berücksichtigen, über welchen Frequenzbereich die Summe in der Prognose gebildet wird und welche Hoch- und Tiefpassfilter das Messgerät verwendet. In diesem Fall werden

die Daten für den genannten Frequenzbereich von 20 Hz bis 2000 Hz dargestellt und auch die Summenwerte für diesen Bereich angegeben. Aus den Daten ist ersichtlich, dass die Summe auch maßgeblich in diesem Frequenzbereich begründet ist.

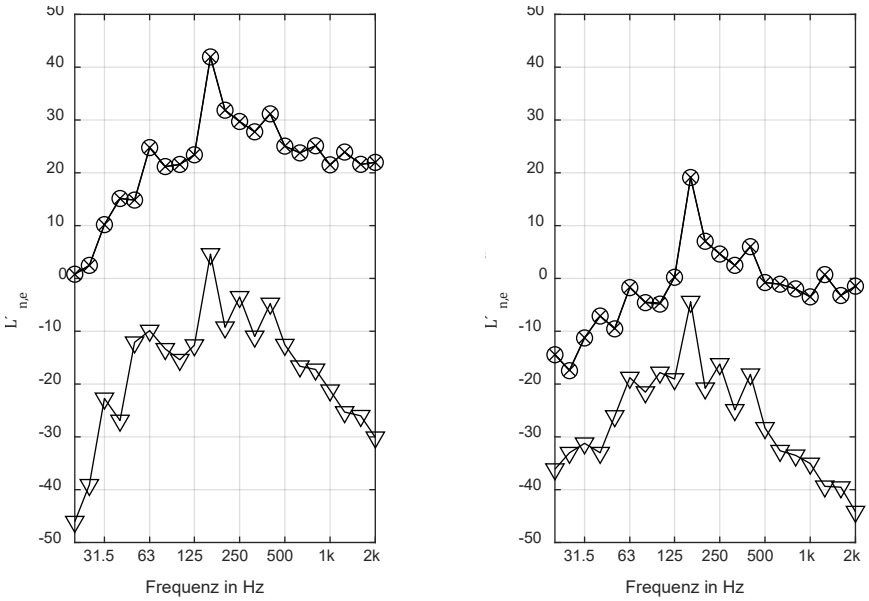


Abbildung 5: Resultierender normierter A-bewerteter Schalldruckpegel für die horizontale Übertragung (links) und die vertikale Übertragung aus Abbildung 4 und Abbildung 5 für die Eingangsdaten er Quelle aus Abbildung 6. Kreise zeigen den Körperschallanteil $L'_{\mathrm{n,e,s},i}$, Dreiecke den Luftschallanteil $L'_{\mathrm{n,e,a}}$ und Kreuze den resultierenden Pegel $L'_{\mathrm{n,e}}$. Der resultierende A-bewertete Summenpegel bei der horizontalen Übertragung ist 42 dB, bei der vertikalen Übertragung 20 dB.

In Abbildung 5 zu erkennen, dass in beiden Übertragungssituationen der Körperschallanteil deutlich dominiert bzw. der Luftschallanteil keinen Einfluss hat. Allerdings ist der Unterschied bei der vertikalen Übertragung geringer.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die nun vorhandenen Daten ermöglichen es, einen Katalog für die Prognose aufzusetzen der sowohl die Körperschallübertragung als auch die Luftschallübertragung abbildet. Mit den vorhandenen Parametern können entsprechende Filter gesetzt werden, um Gruppen zu erstellen. Diese Daten können dann gemeinsam mit Daten der Quellen eingesetzt werden, um erstmalig den Schalldruckpegel aus gebäudetechnischen Anlagen im Holzbau prognostizieren zu können. Die Methodik ermöglicht es auch für definierte Übertragungssituationen Daten zu messen. Das bietet sich möglicherweise innerbetrieblich für wiederkehrende Konstruktionen und Grundrisssituationen an. So kann auch eine individuelle Prognoserechnung mit geringerer Unsicherheit durchgeführt werden.

Basierend auf den bereits gewonnenen Erkenntnissen ist ein wichtiger nächster Schritt nun die Betrachtung der Unsicherheiten mit dieser Methodik. Dabei ist die Gesamtunsicherheit zu betrachten. Diese umfasst nicht nur die Übertragung im Gebäude sondern auch die Unsicherheiten bei der Ermittlung der Eingangsdaten der Quellen.

6. Danksagung

Die wesentliche Erweiterung der Datenbasis für die Übertragungsfunktionen konnte im Rahmen eines vom Seeoner Kreis e.V., dem Forum Holzbau, dem Holzbau Deutschland Institut, dem Deutschen Holzfertigbau-Verband e. V. sowie dem Bundesverband Deutscher Fertigbau e. V. finanzierten Projektes in den vergangenen Jahren durchgeführt werden. Dank gilt dabei auch Müller-BBM VibroAkustik Systeme für die Unterstützung in der Messtechnik.

7. Literatur

[1] DIN EN ISO 3740:2019-08 Akustik – Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräuschquellen – Leitlinien zur Anwendung der Grundnormen

[2] DIN EN 15657:2017-10 Akustische Eigenschaften von Bauteilen und von Gebäuden – Messung des Körperschalls von haustechnischen Anlagen im Prüfstand für alle Installationsbedingungen

[3] Mayr AR, Gibbs BM (2012) Single equivalent approximation for multiple contact structure-borne sound sources in buildings. Acta Acust united Ac 98:402–410

[4] DIN EN 12354-5:2023-08 Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften: Teil 5: Installationsgeräusche;

[5] Schöpfer F, Hopkins C, Mayr AR et al. (2017) Measurement of transmission functions in lightweight buildings for the prediction of structure-borne sound transmission from machinery. Acta Acust united Ac:451–464

[6] DIN EN ISO 10848-1:2018-02 Akustik – Messung der Flankenübertragung von Luftschall, Trittschall und Schall von gebäudetechnischen Anlagen zwischen benachbarten Räumen im Prüfstand und am Bau: Teil 1: Rahmendokument

[7] Fischer H-M (2001) Determination and use of transfer functions to describe structure-borne sound transmission caused by equipment and installations.
In: Proceedings of ICA 2001

[8] Scholl W (2005) About a test facility for installation noise in wooden houses.
In: Proceedings of Forum Acusticum 2005, pp 1977–1981

[9] Arnold J, Kornadt O (2014) Beschreibung Körperschallinduzierter Schalldruckpegel mit Hilfe von Übertragungsfunktionen. In: Fouad NA (ed) Bauphysik Kalender 2014.
Wiley-VCH Verlag, D-69451 Weinheim, Germany, pp 641–663

[10] Bayer J, Schöpfer F, Mayr AR et al. (2022) Prognoseverfahren für Installationsgeräusche im Holzbau. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (ed)
Fortschritte der Akustik – DAGA

Die DIN 4109 und weitere Richtlinien – viel Neues oder Durcheinander?

Martin Schneider
Hochschule für Technik Stuttgart
Stuttgart, Deutschland



Heinz-Martin Fischer
Hochschule für Technik Stuttgart
Stuttgart, Deutschland



DIN 4109 und weitere Richtlinien – viel Neues oder Durcheinander?

1. Einleitung

Der Schallschutz in und an Gebäuden bleibt angesichts der Lärmbelastung durch Außenlärm (z.B. Verkehrslärm), Nachbarschaftslärm (Luft- und Trittschall) sowie durch Lärm von gebäudetechnischen Anlagen (z.B. Aufzüge) wichtig. Die DIN 4109 «Schallschutz im Hochbau» mit Ihrer 80jährigen Tradition beschäftigt sich mit dem Schallschutz in Bezug auf Anforderungen und mit den rechnerischen und messtechnischen Nachweisverfahren an den Schallschutz innerhalb des Gebäudes und dem Schallschutz gegenüber dem Außenlärm. Der Teil 1 der DIN 4109 [1] mit den «Mindestanforderungen» ist bauaufsichtlich eingeführt und damit beim Neubau, aber auch bei der Sanierung von Gebäuden zu beachten und einzuhalten. Der Teil 2 beschreibt Rechenverfahren, die Teile 31 bis 36 (Bauteilkatalog) beinhalten die Eingangsdaten für den Teil 2 und der Teil 4 beschreibt die messtechnischen Nachweise. Im August 2020 wurde die DIN 4109 mit dem Teil 5 «Erhöhte Anforderungen» [2] ergänzt. Neben den «Mindestanforderungen» und den «Erhöhte Anforderungen» der DIN 4109 existiert eine Reihe weiterer Dokumente, die sich mit weitergehenden Anforderungen an den Schallschutz bzw. mit der Klassifizierung des Schallschutzes befassen:

- VDI 4100:2012-10:
  Schallschutz im Hochbau – Wohnungen – Beurteilung
  und Vorschläge für erhöhten Schallschutz [3]
- DEGA-Empfehlung 103: 2018-01
  Schallschutz im Wohnungsbau – Schallschutzausweis [4]
- ISO/TS 19488:2021-04:
  Akustik – Akustisches Klassifizierungssystem für Wohngebäude [5]

Im nachfolgenden Beitrag wird einerseits, auch um die Bedeutung der DIN 4109 im baulichen Schallschutz zu würdigen, die historische Entwicklung der DIN 4109 aufgezeigt. Andererseits werden verschiedene Dokumente mit Anforderungen an den Schallschutz in Bezug zur DIN 4109 gesetzt, um die rechtliche Gewichtung, die teilweise unterschiedlichen Anwendungsgebiete sowie die Herangehensweise zu beleuchten. Weiterhin soll auf die historische, aber vor allem auch die aktuelle Entwicklung der Anforderungswerte und der Rechenverfahren in DIN 4109 eingegangen werden, da aktuell in den zuständigen Normungsgremien zu DIN 4109 an einer Überarbeitung der gesamten Normenreihe gearbeitet wird.

2. Historische Entwicklung der DIN 4109

Die DIN 4109 ist in Deutschland die maßgebliche Norm für die Bauakustik. Schon von Anfang an (z.B. im Jahr 1944 als DIN 4109 «Richtlinie für den Schallschutz im Hochbau») hat sie die Aufgabe übernommen, die von staatlicher Seite im Zuge des Bauordnungsrechts gestellten Anforderungen an den baulichen Schallschutz zu formulieren. Darin wird auch oft ihre wichtigste Aufgabe gesehen. Daran hat sich auch nach der Harmonisierung europäischer Normen im Baubereich nichts geändert, da die Anforderungen in nationaler Hoheit verblieben sind.

Im Jahr 1938 wurde die DIN 4110 [6] bekannt gegeben. Sie war die erste deutsche Norm, die sich mit dem baulichen Schallschutz beschäftigte. Sie traf mit einem Umfang von etwa einer Seite zahlenmäßige Festlegungen für die Luft- und Trittschallübertragung in Wohnungen. Beispielsweise wurde für Wohnungstrennwände eine flächenbezogene Masse von mindestens 450 kg/m² gefordert. Mit dieser Wand (in der Regel damals verputztes 240 mm Ziegelmauerwerk) würde man die heute im Wohnungsbau geforderten Mindestwerte des Bau-Schalldämm-Maßes von $R'_w \geq 53$ dB immer noch übererfüllen.

Was damals begonnen hatte, endete (vorläufig) mit DIN 4109:2016/2018 auf mehr als 400 Seiten, verteilt auf zehn einzelne Normteile. Alleine diese quantitative Betrachtung lässt erahnen, dass der normativ geregelte bauliche Schallschutz einer ständigen Entwicklung und Erweiterung seines Anwendungsbereichs unterworfen war. Von den ersten Festlegungen zum Schallschutz bis zum heutigen Stand ist – dann unter dem Namen DIN 4109 – ein Normenwerk geworden, das nicht nur die Anforderungen festlegt, sondern auch messtechnische und rechnerische Nachweise behandelt, Bauteildaten («Ausführungsbeispiele») nennt und Hinweise für die Planung und Ausführung gibt. Damit hat sich diese Norm schrittweise von der Sicherstellung des Schutzanspruchs aus staatlicher Sicht zum zentralen Regelwerk des baulichen Schallschutzes entwickelt, das nicht nur für den staatlich geregelten Bereich das Anforderungs- und Nachweiskonzept liefert, sondern auch für die bauakustische Planung ein modernes und leistungsfähiges Werkzeug darstellt.

Ein kurzer Überblick zeigt einige wichtige Schritte der Entwicklung:
Nach den ersten normativen Regelungen für den baulichen Schallschutz in DIN 4110:1938 erschien im April 1944 die erste eigene Norm zum baulichen Schallschutz als DIN 4109 [7] und begründete unter dem erstmals verwendeten Namen «DIN 4109 Richtlinie für den Schallschutz im Hochbau» die Tradition dieser Norm. Die Norm wurde als technische Baubestimmung durch Erlass des Reichsarbeitsministers vom 18.04.1944, IVa 8 Nr. 9613-4/43 eingeführt. Hierdurch wurde der Nachweis des Schallschutzes Teil der Baugenehmigung. Im Jahr 1962 wurde die DIN 4109 mit insgesamt 5 Blättern neugefasst [8]. Dabei wurden die Anforderungen nun an das Luft- und Trittschallschutzmaß (mit den heute noch verwendeten Bezugskurven) gestellt. Die bisherigen Anforderungen an Treppenhauswände, Wohnungstrennwände und -decken wurden durch Anforderungen an Schulen, Krankenhäuser etc. ergänzt. Ebenfalls ergänzt wurden Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz. Ein eigenes Blatt bezüglich der Verwendung und Ausführung von schwimmenden Estrichen macht deutlich, dass mit der DIN 4109 bereits im Jahr 1962 nicht nur Anforderungen, sondern auch neue Baukonstruktionen eingeführt und entsprechende Ausführungsbeispiele angegeben wurden.

Die Normentwürfe zur DIN 4109 von 1979 [9] und 1984 [10] stellten den Versuch dar, in 5 bzw. 6 Normteilen die Normeninhalte in zeitgemäßer Form neu zu gliedern und zu erweitern. DIN 4109:1989 [11] erhielt zusammen mit den Beiblättern 1 [12] und 2 [13] eine neue Struktur und enthielt zum ersten Mal rechnerische Nachweise für den Massiv- und Holz-/Leichtbau. Dazu wurden die benötigten Bauteildaten in Form von «Ausführungsbeispielen» geliefert.

Mit der DIN 4109:2016 wurde die DIN 4109 an die europäischen Normen des baulichen Schallschutzes angepasst und erfuhr eine komplette Neugestaltung. Man erkennt, dass etwa alle 25 Jahre (1938/1962/1989/2016) wesentliche Schritte zur Weiterentwicklung der Norm erfolgten. Allerdings hat es die DIN 4109 in der 2016er Version mit Bezug auf die Anforderungsgrößen versäumt, neue Entwicklungen, die in vielen anderen europäischen Ländern stattfanden, ebenfalls aufzugreifen. Hier sind z.B. ein erweiterter Frequenzbereich (50 Hz – 5000 Hz), die Spektrumanpassungswerte beim Außenlärm (C oder C_{tr}) bzw. der Spektrumanpassungswert beim Trittschall (CI,50-2500) zu nennen. Auch dass die Anforderungsgrößen, z.B. beim Luftschall nicht, wie einmal geplant, von den sogenannten «bauteilbezogenen» Kenngrößen (Bau-Schalldämm-Maß R'_w) auf die «raumbezogenen» Kenngrößen (Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$) umgestellt wurden, führte zu einer komplizierteren Darstellung der Anforderungen in der Norm.

3. Regelwerke zu Schallschutzanforderungen

Als Norm entsteht die DIN 4109 zwar in einem regulären Normungsprozess (entsprechend den Statuten für die Normungsarbeit in DIN 820) beim Deutschen Institut für Normung (DIN), erlangt aber erst durch die nachfolgende «bauaufsichtliche Einführung» den Status einer rechtsverbindlichen Festlegung. Dazu werden die bauordnungsrechtlich relevanten Inhalte der DIN 4109 durch so genannte Einführungserlasse als Technische Baubestim-

mung in das Bauordnungsrecht der Bundesländer übernommen. Grundlage dieser Einführungserlasse ist die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB). Die derart in das Baurecht übernommenen Anforderungen sind Mindestanforderungen, die nicht unterschritten werden dürfen.

Eine Besonderheit der DIN 4109 ist, dass sie nicht nur die Anforderungen des baulichen Schallschutzes festlegt, sondern auch Vorgaben enthält, wie deren Einhaltung nachgewiesen werden kann und Hinweise gibt, wie sie realisiert werden können. In Deutschland werden die Nachweise zur Einhaltung der Anforderungen der DIN 4109-1 i.d.R. rechnerisch, mittels DIN 4109-2 und dem Bauteilkatalog DIN 4109-31 bis 36 [14] geführt, aber auch die messtechnischen Nachweise sind in DIN 4109-4 [15] geregelt. Darüber hinaus enthält DIN 4109 schon von Anfang an Hinweise für die Planung und Ausführung. Damit ist die DIN 4109 in ihrer Gesamtheit ein vor allem umfassendes Planungsinstrument, das alle Bereiche der Auslegung und Umsetzung des baulichen Schallschutzes abdeckt.

3.1. DIN 4109-1 Mindestanforderungen

Die Mindestanforderungen der DIN 4109-1 haben als wesentliches Schutzziel den Gesundheitsschutz. Weiterhin soll eine ausreichende Vertraulichkeit hergestellt und es soll ein Schutz vor unzumutbaren Belästigungen sichergestellt werden. Diese Schutzziele werden durch Anforderungen an die Luft- und Trittschalldämmung innerhalb der Gebäude, durch eine ausreichende Schalldämmung der Gebäudehülle zum Schutz gegenüber Außenlärm und durch Anforderungen an maximal zulässige Schallpegel, erzeugt von gebäudetechnischen Anlagen, erreicht.

Dabei haben sich beispielsweise die Anforderungen an den Luftschallschutz von Wohnungstrennwänden gegenüber der ersten Ausgabe der DIN 4109 nicht erhöht. Deutlich erhöht haben sich die Anforderungen an den Trittschallschutz. Hier fand eine kontinuierliche Anpassung der Anforderung an die bauliche Entwicklung statt. Durch den Einbau von schwimmenden Estrichen im Massivbau und deren schalltechnische Weiterentwicklung konnten Trittschallgeräusche immer weiter gesenkt werden. Die aufgrund statischer Erfordernisse (größere Spannweiten, höhere Betonüberdeckung) immer dickeren und damit schwereren Massivdecken trugen ebenfalls zu einer deutlichen Verminderung der Trittschallpegel bei, so dass die Anforderungen an den zulässigen Trittschallpegel in DIN 4109 sowohl 1962 als auch 1989 und 2016 erhöht werden konnten.

Die Anforderungen in DIN 4109 unterscheiden sich in Bezug auf die Nutzung von Gebäuden: Gebäude mit Wohn- und Arbeitsbereichen sowie Nichtwohngebäude wie Schulen, Beherbergungsstätten und Krankenhäuser. Bei Wohngebäuden wird zusätzlich noch zwischen Mehrfamilienhäusern und Einfamiliendoppel- und Reihenhäusern unterschieden. Obwohl eigentlich der anzustrebende Gesundheitsschutz der Bewohner gleich sein sollte, werden hier unterschiedliche Anforderungswerte an den Schallschutz gestellt. Die höheren Anforderungen bei den Doppel- und Reihenhäusern ergeben sich aus der üblicherweise zweischaligen ausgeführten Trennwand. Hier wird auch ein Dilemma der DIN 4109 deutlich: einerseits werden globale Anforderungen bezüglich des Gesundheitsschutzes gestellt andererseits ergeben sich die Anforderungen aus baukonstruktiven Möglichkeiten bzw. Gegebenheiten der jeweiligen Zeit.

Aktuell findet im Normenausschuss zur DIN 4109 eine Diskussion um eine Absenkung der Mindestanforderungen aufgrund der schwierigen wirtschaftlichen Lage im Wohnungsbau statt. Mit der Absenkung der Anforderungen hofft man einen Beitrag zur Senkung von Baukosten zu leisten. Allerdings konnte bislang nicht nachgewiesen werden, ob mit solch einer Absenkung tatsächlich Baukosten in signifikantem Umfang eingespart werden können. Dabei erzeugt der Schallschutz im Wohnungsbau nicht nur Kosten. Aufgrund des Schutzes der Gesundheit der Bewohner müssen die hieraus resultierenden Gewinne (gesunder Schlaf, Erholungswert der leisen Wohnung, etc.) entsprechend auch kostenmäßig gegengerechnet werden. Die Mindestanforderungen der DIN 4109-1 werden in der Regel beim Bau z.B. von Studentenwohnheimen, Altersheimen und beim staatlich geförderten kostengünstigen Bauen von Mietwohnungen angewendet. Bei entsprechender Aufklärung der Käufer können natürlich auch kostengünstige Eigentumswohnungen mit dem Mindestschallschutz der DIN 4109-1 geplant werden.

Unterhalb der Mindestanforderungen darf nur mit Genehmigung der Baubehörde gebaut werden. Dies ist in Ausnahmefällen möglich, z.B. bei experimentellen Bauten, bei der Sanierung/Renovierung von Bestandsgebäuden, wenn der Aufwand unverhältnismäßig zur tatsächlichen Verbesserung des zu erwartenden Schallschutzes ist oder der geforderte Schallschutz mit der vorhandenen Baukonstruktion gar nicht erreicht werden kann. Auch bezüglich der Kennwerte, mit denen die Anforderungen in DIN 4109-1 beschrieben werden, ist Bewegung zu spüren. So soll zukünftig der Schallschutz gegenüber Außenlärm unter Berücksichtigung der Spektrumanpassungswerte C und C_{tr} nachgewiesen werden. Auch wird diskutiert, ob die aktuelle Anforderungsgröße zu den gebäudetechnischen Anlagen (maximaler A-bewerteter Norm-Schalldruckpegel $L_{AF,max,n}$) nicht durch die nachhallzeitbezogene Kenngröße (maximaler A-bewerteter Standard-Schalldruckpegel $L_{AF,max,nT}$) ersetzt werden soll.

3.2. DIN 4109-5 Erhöhte Anforderungen

Bereits in der DIN 4109 von 1962 existieren neben den Mindestanforderungen Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz. Gegenüber den Mindestanforderungen wurden in der Ausgabe von 1962 beim erhöhten Schallschutz beim Luftschall im mehrgeschossigen Wohnungsbau ca. 3 dB, beim Trittschallschutz 10 dB höhere Anforderungen gestellt. Diese Werte wurden dann im Wesentlichen in Beiblatt 2 zu DIN 4109:89 mit den Empfehlungen für einen erhöhten Schallschutz übernommen. Gegenüber der Ausgabe von 1962 wurden allerdings beim erhöhten Luftschallschutz für Trennwände in Einfamilien-Doppel- und Reihenhäusern die Anforderungen deutlich erhöht.

Bei der Überarbeitung der DIN 4109 in den 2010er Jahren wurde aufgrund der Weigerung einiger Verbände (Immobilen- und Wohnungsbauwirtschaft, Zentralverband Deutsches Baugewerbe, …) einen erhöhten Schallschutz zu normen, keine erhöhten Anforderungen gestellt. Mit Veröffentlichung der DIN 4109 Reihe 2016 erfolgte die Planung des erhöhten Schallschutzes entweder außerhalb der DIN 4109 mit VDI 4100 oder DEGA Schallschutzausweis oder aber mit den Werten des alten Beiblatt 2 aus dem Jahr 1989. Eine Planung des erhöhten Schallschutzes bei Wohnungstrennwänden mit dem Wert aus Beiblatt 2, der gegenüber den Mindestanforderungen nur um 1 dB erhöht ist, war allerdings aufgrund verschiedener höchstrichterlicher Urteile sehr umstritten. Häufige Rechtstreite bezüglich des vereinbarten bzw. geschuldeten Schallschutzes führten dann dazu, dass die Verbände, die eine Normung des erhöhten Schallschutzes ablehnten, eine Erarbeitung eines Dokuments beim DIN anstießen. Die dann 2017 erschienene DIN SPEC 91314:2017-01: [16] (DIN SPEC: ein von einer Interessengruppe initiiertes Papier, beim DIN veröffentlicht) sollte entsprechend dem Wunsch der beteiligten Verbände für den Wohnungsbau den erhöhten Schallschutz normativ abdecken. Aufgrund der breiten Widerstände zu diesem Papier wurde dann aus Beiblatt 2 und DIN SPEC 91314 die DIN 4109-5:2020-08 Schallschutz im Hochbau – Teil 5: Erhöhte Anforderungen [2] erarbeitet und im Konsens 2020 veröffentlicht. Mit nur einer Stufe für den erhöhten Schallschutz, keinen Vorschlägen für einen Schallschutz im eigene Bereich, keinen Anforderungsgrößen im erweiterten Frequenzbereich und keinen gegenüber den Mindestanforderungen erhöhten Anforderungen beim Außenlärm wird der Teil 5 der DIN 4109 häufig als Grundlage für die Planung mit einem üblichen Komfortanspruch von Wohnungen (Eigentumswohnungen) bzw. von Einfamilien-Reihenhäusern verwendet.

3.3. VDI 4100

Die erste VDI 4100 [3] erschien im Jahre 1994 und war das erstes Klassifizierungsschema in Deutschland mit 3 Schallschutzstufen. Die Schallschutzstufe SSt1 entsprach bei Mehrfamilienhäusern den Mindestanforderungen der damalig gültigen DIN 4109 Die Schallschutzstufen II und III wiesen mit einem Abstand von jeweils 3 dB beim Luftschall und 7 dB beim Trittschall einen deutlich wahrnehmbar besseren Schallschutz auf. Grundlegend neu war dabei eine Beschreibung der Wahrnehmung von Geräuschen aus Nachbarwohnungen in den verschiedenen Schallschutzstufen. Bei der Überarbeitung der VDI 4100 mit der Veröffentlichung im Jahr 2012 wurde von den «bauteilbezogenen» auf die «nachhallbezogenen» Kenngrößen umgestellt. Es blieb zwar bei den 3 Klassen für den erhöhten

Schallschutz, problematisch bezüglich der Akzeptanz war allerdings, dass der Mindestschallschutz der DIN 4109 nicht mehr aufgeführt wurde und die neue Schallschutzstufe I dem Niveau der alten Stufe II entsprach. Aufgrund der unglücklichen Benennung der Schallschutzstufen sowie des Wechsels der Kenngrößen erfuhr die VDI 4100 eine deutliche Verminderung der Akzeptanz. Zur Zeit läuft hier eine Überarbeitung mit dem Ziel einer Zusammenführung der VDI 4100 mit der DEGA Empfehlung 103.

3.4. DEGA Empfehlung 103

Die DEGA Empfehlung 103 «Schallschutz im Wohnungsbau – Schallschutzausweis» [4] wurde im Juni 2009 erstmals und als überarbeitete Version im Januar 2018 wieder veröffentlicht. In der DEGA Empfehlung 103 wird der Schallschutz von Wohngebäuden in 7 Schallschutzklassen A* bis F; klassifiziert. Dabei entspricht die Klasse D den Mindestanforderung der DIN 4109-1- für mehrgeschossige Wohngebäude. Die Klassen E und F sind für die Klassifizierung von Bestandsgebäuden vorgesehen und könnten aber auch zukünftig für die seit einiger Zeit diskutierte Gebäudeklasse E (für einfache Gebäude) verwendet werden. Die Klassen C und B beschreiben einen erhöhten Schallschutz im Geschosswohnungsbau, A und A* einen erhöhten Schallschutz bei Einfamilien-Doppel- und Einfamilien-Reihenhäusern. Mit einer ausführlichen Beschreibung der subjektiven Wahrnehmbarkeit von üblichen Geräuschen in den verschieden Schallschutzklassen können auch Laien sich ein Bild von den zu erwartenden Geräuschen in der Wohnung machen.

Im Gegensatz zu DIN 4109 und VDI 4100 kennt die DEGA-Empfehlung 103 bei der Beschreibung des Schallschutzes hinsichtlich der Schallschutzstufen keine Trennung zwischen dem Einfamilien-Reihenhaus und dem Mehrfamilienhaus. Hierdurch wird dem Käufer bzw. dem Bewohner des entsprechenden Bauwerks die tatsächliche Einstufung des Schallschutzes transparent gemacht. Mit dem Schallschutzausweis wird mittels eines Punktesystems die schalltechnische Qualität einer Wohnung bewertet und transparent einer Schallschutzklasse zugeordnet. Auch der Schallschutz im eigenen Wohnbereich kann mittels DEGA Empfehlung 103 beurteilt werden. Moderne Wohnformen mit offenen Grundrissen sowie vermehrt technische Einrichtungen, wie z.B. eine zentrale Wohnungslüftung, erzeugen bei den Nutzern ein Hinterfragen des Schallschutzes im Hinblick auf Geräusche aus dem «eigenen Wohnbereich». Die Anforderungen für die 3 Schallschutzklassen im eigenen Wohnbereich können optional bei der Planung des Gebäudes berücksichtigt werden.

4. Rechenverfahren

Die DIN 4109 versuchte ständig, die aktuellen Bauweisen abzubilden und so dem technischen Fortschritt zu folgen. Das gelang ihr angesichts der langen Zeitintervalle zwischen den einzelnen Normausgaben allerdings nur mit großen Verzögerungen. Durch eine neue Gliederung der DIN 4109 von 2016 und die Neustrukturierung der Normungsarbeit an der DIN 4109 seit 2006 hat sich das allerdings geändert. Die Berechnungsverfahren sind nun, genauso wie der Bauteilkatalog, in jeweils eigenen Normteilen niedergelegt, so dass sie unabhängig von anderen Normteilen ergänzt und aktualisiert werden können. Das ist seit Herausgabe der Fassungen von 2016 bereits einige Male geschehen. Die Weiterentwicklung der Dokumente zu den Berechnungsverfahren und zum Bauteilkatalog wird dadurch erleichtert, dass dafür nun ein eigener Normenausschuss zuständig ist (NA 005-55-75 AA «Nachweisverfahren, Bauteilkatalog, Sicherheitskonzept»). In umgekehrter Richtung hat die DIN 4109 allerdings auch immer wieder technische Entwicklungen des baulichen Schallschutzes unterstützt, angestoßen oder sogar forciert. Beispiele sind schwimmende Estriche, zweischalige Haustrennwände sowie Entwicklungen bei der Flankenübertragung im Massivbau.

4.1. Historische Entwicklung der Rechenverfahren

In der Ausgabe von 1962 im Blatt 3 werden nur Ausführungsbeispiele für Bauteile genannt, welche die im Blatt 2 genannten Anforderungen erfüllen. In der Ausgabe von 1989 sind im Beiblatt 1 Rechenverfahren zur Berechnung des zu erwartenden bewerteten Bau-Schalldämm-Maßes bzw. des bewerteten Normtrittschallpegels unter (einer relativ pauschalen) Berücksichtigung der flankierenden Übertragung angegeben. Diese häufig

fälschlicherweise «Gösele-Verfahren» genannte Herangehensweise beruht unter anderem auf Berechnungen mit dem Gösele-Verfahren, einem vereinfachten Vorgänger des aktuellen Berechnungsverfahrens. Bei dem Gösele-Verfahren wird die Flankenübertragung aus der Direktdämmung des angeregten Bauteils und der Stoßstellendämmung (bei Gösele Schnelle-Pegeldifferenz) berechnet.

Ein maßgeblicher Impuls für technische Weiterentwicklungen war in den letzten 20 Jahren die Einbeziehung der europäischen Normung des baulichen Schallschutzes. Umfangreiche Untersuchungen zur Einbindung von Produkten und Bauweisen in die Nachweisverfahren der EN 12354 Reihe und der überarbeiteten DIN 4109 von 2016 lenkten z.B. verstärkt den Blick auf die Flankenübertragung und sorgten für optimierte Produkte und Bauweisen, z.B. bei der Stoßstellengestaltung im Massivbau oder den Bauteilverbindungen im Holzbau.

Ausgehend von Untersuchungen, wie sie z.B. Gösele in [17] vorlegte, wurde man sich der Tatsache bewusst, dass hochwärmedämmende Lochsteine aufgrund ihrer Lochstruktur nicht wie einschalige homogene Bauteile betrachtet werden konnten, deren Schalldämm-Maß aus der flächenbezogenen Masse bestimmt werden konnte. Umfangreiche Untersuchungen durch Förderung aus der öffentlichen Hand und aus der Wirtschaft führten zu einem grundlegenden Verständnis der auftretenden Phänomene und zu bautechnischen Lösungen in Form von akustisch optimierten Lochsteinen. Aber auch die schalltechnische Prognose konnte für solche Bauweisen, basierend auf den Verfahren der EN 12354, auf neue Beine gestellt werden. Die DIN 4109 war damit das erste akustische Regelwerk, das die planerische Berücksichtigung solcher Produkte und einen schalltechnischen Nachweis ermöglichte.

Bei der flankierenden Übertragung leichter massiver Wände war das alte Verfahren an seine Gültigkeitsgrenzen gestoßen. Die detaillierte Betrachtung der flankierenden Schallübertragung entsprechend den Berechnungsverfahren nach EN 12354 machte deutlich, dass auch die Bauteilverbindungen (Stoßstellen) mit der neuen Kenngröße K_{ij} in den Blick zu nehmen und in der Planung zu berücksichtigen sind. Im Vorfeld der neuen DIN 4109 führte die Umsetzung der europäischen Berechnungsverfahren zu zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die sich mit dem Stoßstellenverhalten und der flankierenden Übertragung beschäftigten. Daraus ergaben sich optimierten Stoßstellenlösungen, z.B. für Außenwände in Ziegelbauweise oder für die Entkopplung leichter massiver Wände. Solche konstruktiven Lösungen haben Eingang in die Baupraxis gefunden und sind seit 2016 teilweise auch in der DIN 4109 (Rechenverfahren und Bauteilkatalog) verankert.

Nicht nur die Mindestanforderungen (DIN 4109-1), sondern auch die Rechenverfahren (DIN 4109-2) und d Bauteilkataloge (DIN 4109, Teile 31 bis 36) sind Teil der Baubestimmungen der Länder und damit baurechtlich verbindlich anzuwenden. Allerdings sind neben DIN 4109-2 und den Bauteilkatalogen in der MVVTB auch die vereinfachten Rechenverfahren des Beiblatts 1 zu DIN 4109:1989-11 für bestimmte Bauteile des Massivbaus zulässig. Dabei stellt sich allerdings die Frage, ob mit diesen vereinfachten Nachweisen ein wirtschaftlicher Schallschutz möglich ist.

4.2. Neue Entwicklung bei den Rechenverfahren in DIN 4109-2

Im Rahmen der aktuellen Überarbeitung der gesamten Normenreihe werden nachfolgend die wesentlichen Entwicklungen im Bereich der Rechenverfahren aufgezeigt.
Aufgrund der vorgesehenen Änderung der Anforderungsgrößen beim Außenlärm durch die Berücksichtigung der Spektrumanpassungswerte sind diese sowohl im Rechenverfahren als auch bei den Kennwerten von Außenbauteilen im Bauteilkatalog zu berücksichtigen.

Die Berechnung der flankierenden Trittschallübertragung soll zukünftig deutlich detaillierter und damit genauer erfolgen. Das bisherige Verfahren der pauschalen Berücksichtigung aller Flankenübertragungswege (im Massivbau durch einen Korrektursummand K, im Holzbau durch K_1 und K_2) soll zwar beibehalten werden, aber durch ein neues, der europäischen Normung in DIN EN ISO 12354-2:2017 [18] entsprechendes, Verfahren ergänzt werden. In diesem Verfahren wird weiterhin mit Einzahlangaben gerechnet, jedoch werden die Trittschallpegel auf den Schallübertragungswegen getrennt berechnet und anschließend zum gesamten Trittschallpegel am Bau aufsummiert. Mit der genaueren Betrachtung der Flankenübertragung soll dann auch ein reduzierter Sicherheitsbeiwert angesetzt werden.

Auch in Bezug auf die gebäudetechnischen Anlagen sind Änderungen beim Nachweisverfahren zu erwarten. Die aktuell vorhanden Verfahren (Referenzlösungen, z.B. Musterinstallationen) sollen bestehen bleiben, aber durch ein zusätzliches, frequenzabhängiges Verfahren zur Berechnung der Schalldruckpegel von gebäudetechnischen Anlagen entsprechend den Vorgaben in DIN EN ISO 12354-5 [19] ergänzt werden. Hierbei werden entsprechende frequenzabhängige Eingangsgrößen benötigt. Dabei handelt es sich einerseits für die gebäudetechnischen Anlagen um Labordaten, welche die Quelle beschreiben, andererseits um Daten, mit denen die Übertragungseigenschaften des Gebäudes beschrieben werden können. Sind diese Eingangsdaten vorhanden, können erstmals die Schallpegel von gebäudetechnischen Anlagen normativ rechnerisch nachgewiesen werden.

5. Zusammenfassung

Die DIN 4109 hat in Deutschland den Schallschutz im Hochbau hinsichtlich der bauaufsichtlich zu erfüllenden Anforderungen, aber auch in Bezug auf die bautechnischen Entwicklungen, maßgeblich geprägt. Sie war lange Zeit das maßgebliche Dokument in der Bauakustik und hat entscheidende Impulse im Baugeschehen gegeben. Allerdings haben sich die Anforderungswerte in den letzten Jahrzehnten kaum noch verändert, wobei jetzt sogar Anpassungen aus dem Jahr 2016 gegenüber der Ausgabe 1989 rückgängig gemacht werden sollen. Dabei wurde und wird der Wunsch der Bewohner nach einem an die gesteigerte Wohnungsqualität angepassten Schallschutz nicht Rechnung getragen, so dass Teile der Mindestanforderungen der DIN 4109 in Bezug auf den Wohnungsbau von der Rechtsprechung als nicht mehr zeitgemäß eingestuft werden. Die aktuelle Normenreihe DIN 4109 liefert aber neben den bauaufsichtlich eingeführten Anforderungswerten zum Schallschutz auch die rechnerischen Verfahren mit den entsprechenden Eingangswerten zum Nachweis des Schallschutzes. Hier wurden und werden nationale, aber auch internationale Entwicklungen aufgegriffen und es wird versucht, diese normativ umzusetzen. Mit einem überarbeiteten Rechenverfahren zum Trittschall und zu den gebäudetechnischen Anlagen sowie mit einem besonders für den Holzbau deutlich erweiterten Bauteilkatalog ist es geboten, möglichst zeitnah einen Entwurf der «neuen» DIN 4109 vorzulegen.

6. Literatur

[1] DIN 4109-1:2018-01 Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen

[2] DIN 4109-5:2020-08 Schallschutz im Hochbau – Teil 5: Erhöhte Anforderungen

[3] VDI 4100:2012-10 Schallschutz im Hochbau – Wohnungen – Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz

[4] DEGA-Empfehlung 103 – Schallschutz im Wohnungsbau – Schallschutzausweis, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Fachausschuss Bau- und Raumakustik, Januar 2018

[5] ISO/TS 19488:2021-04 Akustik – Akustisches Klassifizierungssystem für Wohngebäude

[6] DIN 4110 Technische Bestimmungen für die Zulassung neuer Bauweisen, 2. Ausgabe, Berlin Juli 1938, eingeführt als Richtlinie für die Baupolizei durch Erlass des Reichsarbeitsministers vom 12.07.1938, IV 2 Nr.9600/6

[7] DIN 4109:1944: Richtlinie für den Schallschutz im Hochbau (eingeführt durch Erlass des Reichsarbeitsministers vom 18.04.1944, IVa 8 Nr. 9613-4/43

[8] DIN 4109:1962/1963 Schallschutz im Hochbau, Blatt 1 bis Blatt 5

[9] E DIN 4109:1979 Schallschutz im Hochbau, Teile 1, 2, 3, 5, 6,

[10] E DIN 4109 :1984-10 Schallschutz im Hochbau, Teile 1 – 3 und Teile 5 – 7

[11] DIN 4109:1989-11 Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise

[12] DIN 4109 Beiblatt 1:1989-11 Schallschutz im Hochbau, Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren

[13] DIN 4109 Beiblatt 2:1989-11 Schallschutz im Hochbau, Hinweise für Planung und Ausführung; Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz; Empfehlungen für den Schallschutz im eigenen Wohn- oder Arbeitsbereich

[14] DIN 4109-4:2016-07 Schallschutz im Hochbau – Teil 4: Bauakustische Prüfungen

[15] DIN 4109-31:2016-07 Schallschutz im Hochbau – Teile 31 bis 36:
Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog)

[16] DIN SPEC 91314:2017-01: Schallschutz im Hochbau –
Anforderungen für einen erhöhten Schallschutz

[17] Gösele, K.: Verringerung der Luftschalldämmung von Wänden durch Dickenresonanzen, Bauphysik 12 (1990) 187

[18] DIN EN ISO 12354-2:2017-11 Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen (ISO 12354-2:2017); Deutsche Fassung EN ISO 12354-2:2017

[19] DIN EN 12354-5:2023-08 Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 5: Installationsgeräusche;
Deutsche Fassung EN 12354-5:2023

AKUSTIK

Mit Schallschutz wirtschaftlich Bauen!

Schallschutz – Projektbeispiele für ökonomisches Bauen

Anton Kraler
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften,
Arbeitsbereich Holzbau
Universität Innsbruck, Österreich



Schallschutz – Projektbeispiele für ökonomisches Bauen

1. Einleitung

Die Qualität vom Schallschutz im Holzbau hat in den letzten Jahren ein Niveau erreicht, welches mit Baumaterialien höherer Dichte (z.B. Stahlbeton) gleichgesetzt werden kann. Die Frage dabei ist, welcher Aufwand und welche Kosten stecken dahinter im Vergleich zum schweren Massivbau, um dieselbe Schallschutzqualität zu erreichen, und welcher Mehrwert (höhere Lebensdauer, Rückbaubarkeit, Kreislauffähigkeit, umweltschonend, Behaglichkeit, etc.) wird bei höheren Kosten sofort oder in der Zukunft erzielt. Daher ist es wichtig zu überlegen, was in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit vergleichbar ist? Das kann das gesamte Gebäude inklusive der Infrastruktur (Haustechnik), nur der Decken- oder Wandaufbau oder das verwendete Bausystem, Vorfertigung oder die Geschwindigkeit des Bauens sein, um einige zu nennen. Welchen Anteil macht das verwendete Bausystem aus, im Vergleich zum gesamten Gebäude? Daher sind die Sichtweisen bzw. Bewertungen, ob es sich um Ökonomische Bauten handelt, sicherlich differenziert.

In den folgenden Seiten werden Wand-, Decken- und Terrassenaufbauten dargestellt, von denen die meisten die in Österreich geforderten Schallschutzqualitäten erreichen und somit auch in den umliegenden Nachbarstaaten (Deutschland, Schweiz, Italien, etc.) anwendbar sind. Die Aufbauten stammen aus Projekten, bei denen nach der Bau-fertigstellung Schallmessungen durchgeführt wurden. Die gewählten Aufbauten entsprachen somit den wirtschaftlichen oder persönlichen Vorstellungen der Kunden. In wirtschaftlicher Hinsicht kann in diesem Zusammenhang auch die Flexibilität, welche Möglichkeiten der Holzbau bietet, betont werden. Da es sich um Schalluntersuchungen am Bau handelt, sind bei den Messergebnissen auch die Flankenanteile enthalten. Bei den folgenden Wand-, Decken- und Terrassenaufbauten sind die Messergebnisse, die Fläche des Trennbauteils, die flächenbezogene Masse und die Bauteilhöhe angegeben. Durch diese Informationen können Abweichungen von Einzahlwerten bei fast gleichen Bauteilaufbauten besser nachvollzogen werden. D.h., dass z.B. bei größeren Trennbauteilflächen in der Regel höhere Schallschutzwerte erreicht werden oder, dass bei höher flächenbezogener Masse der Schallschutz im tieffrequenten Bereich besser im Vergleich zu geringerer flächenbezogener Masse ist. Der Einzahlwert kann aber trotzdem der gleiche sein.

1.1. Anforderungen an den Schallschutz

In Österreich ist der Schallschutz in der OIB-Richtlinie 5, in den Bauordnungen und in den technischen Bauvorschriften (Normen) geregelt. Für den Luftschallschutz gilt bei Wohnungstrennwänden und Wohnungstrenndecken eine bewertete Standardschallpegeldifferenz von $D_{nT,w} \geq 55$ dB zu erreichen. Für den Trittschall ist ein bewerteter Standarttrittschallpegel $L_{nT,w} \leq 48$ dB gefordert. Grundlagen, Begriffe, Maßnahmen und Beispiele zum Schallschutz sind in den verschiedenen Teilen der ÖNORM B 8115 zu finden. Die Baustellenmessungen bei angeführten Projektaufbauten wurden nach den ÖNORMEN EN ISO 16283 Teil 1, 2 und 3 durchgeführt.

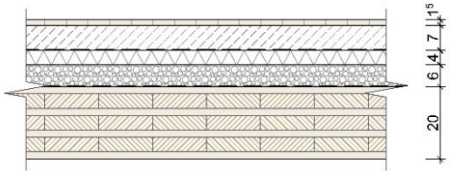
2. Projektbeispiele in Holzbauweise

Bei den gewählten Gebäuden handelt es sich um mehrgeschoßige Holzbauten, die für das Wohnen und als Gästeunterkünfte genutzt werden. Die Wand- und Deckenaufbauten sind teilweise sehr ähnlich, aber aufgrund unterschiedlicher Nutzungen, Lasten, Spannweiten, Begrenzungen der Aufbauhöhen und der statischen Anforderungen mussten die Schichtstärken verändert werden. Trotz der Veränderungen der Bauteilschichten konnten die geforderten Schallwerte erreicht werden. Dabei ist aber anzumerken, dass die Verwendung

mehrerer Aufbauschichten nicht automatisch bedeutet, dass die Qualität des Schallschutzes verbessert wird. Die dargestellten Decken- und Terrassenaufbauten stammen aus neun Holzbauprojekten und die Wandaufbauten aus vier Holzbauprojekten die in Tirol, Österreich errichtet wurden.

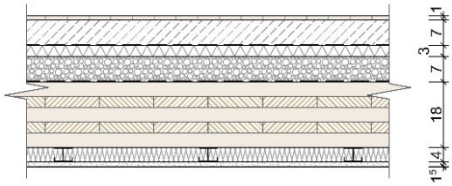
2.1. Geschossdeckenaufbauten mit Brettsperrholz

Die zehn gewählten Deckenaufbauten aus neun Projekten sollen zeigen, welche Möglichkeiten der Veränderung der Bauteilschichten es gibt, um die hohen Anforderungen des Luft- und Trittschallschutzes zu erreichen. Weiters ist ersichtlich, welche Flexibilität mit Grundprinzip *Masse – Feder – Masse* im Holzbau möglich ist. In Bezug auf den Trittschallschutz ist die Trittschalldämmung eine der wichtigsten Schichten. D.h. alleine mit dieser Schicht ist es möglich, den Trittschallschutz um bis zu 10 dB zu verbessern oder zu verschlechtern. Der wesentliche Faktor dabei ist, dass die richtige Wahl der dynamischen Steifigkeit (MN/m³) vom Dämmmaterial gewählt wird. Im Holzbau sollte diese im Bereich von 8 – 10 MN/m³ liegen. In den Abbildungen sind der Luftschall ($D_{nT,w}$), der Trittschall ($L_{nT,w}$), die Bodenfläche des gemessenen Raumes (A), die flächenbezogene Masse (m′) und die Bauteilhöhe angegeben.



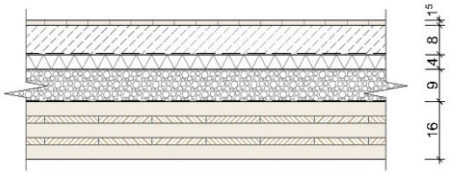
$D_{nT,w}$ =64dB; $L_{nT,w}$=48dB; A=25m²; m′=323 kg/m²

Abbildung 01: Bauteilhöhe = 38,5 cm



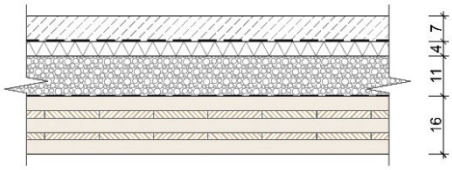
$D_{nT,w}$ =60dB; $L_{nT,w}$=45dB; A=21m²; m′=340 kg/m²

Abbildung 02: Bauteilhöhe = 41,5 cm



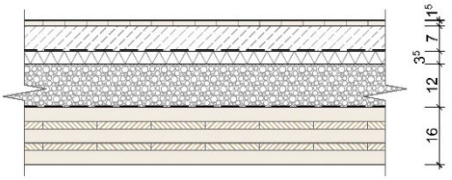
$D_{nT,w}$ =65dB; $L_{nT,w}$=48dB; A=20m²; m′=364 kg/m²

Abbildung 03: Bauteilhöhe = 38,5 cm



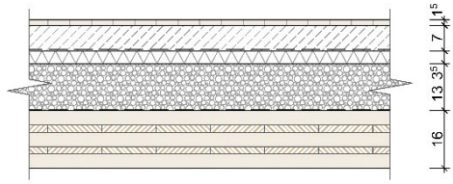
$D_{nT,w}$ =57dB; $L_{nT,w}$=44dB; A=14m²; m′=359 kg/m²

Abbildung 04: Bauteilhöhe = 38,0 cm



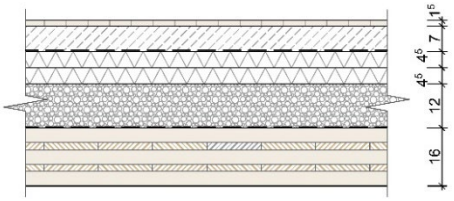
$D_{nT,w}$ =62dB; $L_{nT,w}$=42dB; A=20m²; m′=377 kg/m²

Abbildung 05: Bauteilhöhe = 40,0 cm



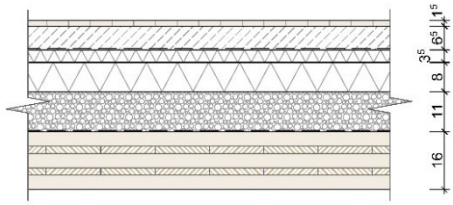
$D_{nT,w}$ =62dB; $L_{nT,w}$=43dB; A=14m²; m′=395 kg/m²

Abbildung 06: Bauteilhöhe = 41,0 cm



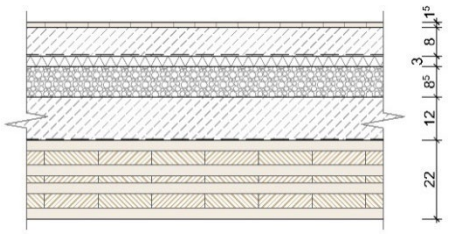
$D_{nT,w}$ =64dB; $L_{nT,w}$=42dB; A=13m²; m′=381 kg/m²

Abbildung 07: Bauteilhöhe = 45,5 cm



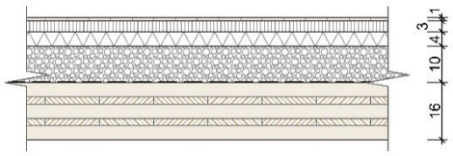
$L_{nT,w}$=54dB (nicht erfüllt); A=14m²; m′=352 kg/m²

Abbildung 08: Bauteilhöhe = 46,5 cm



$D_{nT,w}$ =70dB; $L_{nT,w}$=35dB; A=33m²; m'=485 kg/m²

Abbildung 09: Bauteilhöhe = 55,0 cm



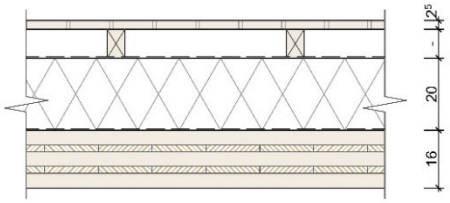
$D_{nT,w}$ =58dB; $L_{nT,w}$=48dB; A=53m²; m'=270 kg/m²

Abbildung 10: Bauteilhöhe = 34,0 cm

Die Dicke der Brettsperrholzdecken hängt in erster Linie von der Spannweite ab. Da für den Schallschutz auch die Biegesteifigkeit für das Verbesserungsmaß ein wichtiger Faktor ist, hat sich aus der Erfahrung herausgestellt, dass es bei Deckenstärken unterhalb von 16 cm häufig zu schalltechnischen Problemen kam. Daher sind bei den Aufbauten nur Deckenstärken mit 16 cm oder höher eingebaut worden. Bei allen Decken (außer Abb. 09) wurde eine Kiesschüttung zur Erhöhung der flächenbezogenen Masse verwendet. Die Höhen variieren zwischen 6 cm und 13 cm. Die Schütthöhe ist in Bezug auf die Gebrauchstauglichkeit durch die erste Eigenfrequenz begrenzt. Je mehr Masse aufgebracht wird, desto niedriger wird die erste Eigenfrequenz. Abhängig der Deckenklasse darf die erste Eigenfrequenz (6 oder 8 Hz) nur durch Zusatznachweise unterschritten werden. Bei den Aufbauten (Abb. 07, 08) konnte die Aufbauhöhe, aus statischen Vorgaben, nicht komplett mit schwerer Masse ausgefüllt werden. Für den Ausgleich wurden zusätzlich Dämmplatten eingebaut. Im Aufbau der Abbildung 07 wird für den Höhenausgleich eine zweite, gleiche Trittschallplatte verwendet, die dynamische Steifigkeit wird verringert und die Schallwerte sind besonders gut. Beim Aufbau (Abbildung 08) wurde für den Höhenausgleich auch eine zusätzliche, doppelt so dicke Dämmplatte eingebaut, d.h. auch hier sollte sich der Schallschutz durch eine höhere Federwirkung verbessern. Der gemessene Wert ist aber um 12 dB schlechter und erfüllt die Anforderung von $L_{nT,w} \leq 48$ dB nicht. Bei der Bewertung der Messkurve ist ersichtlich, dass der Einbruch des Schallschutzes bei ca. 160 Hz passiert und daher die Federsteifigkeit zu hoch ist. Vielschichtige Aufbauten können bei nicht korrekter Abstimmung der Materialien auch einen Umkehreffekt bewirken, vor allem wenn die Resonanzfrequenz nicht richtig abgestimmt ist. Bei dem Aufbau (Abb. 09) handelt es sich um eine Holz-Beton-Verbunddecke mit standardisiertem Bodenaufbau. Aufgrund der hohen Masse, durch die Verbundlösung, konnte eine leichte Dämmschüttung verwendet werden. Der Aufbau (Abb. 10) zeigt eine funktionierende Trockenbaulösung. Anstatt des Nassestrichs wird eine mit Quarzsand gefüllte Kartonplatte verwendet. Da diese Platten selber schon eine hohe innere Dämpfung haben, kann eine Trittschalldämmplatte mit einer höheren dynamischen Steifigkeit (25–30 MN/m³) verwendet werden. Die höhere Steifigkeit ist bei Trockenaufbauten notwendig, damit auch die Punktlasten aufgenommen werden können. Obwohl bei diesem Aufbau, aufgrund eines Fehlers, eine noch steifere Trittschalldämmplatte eingebaut wurde, konnten auch wegen der großen Trennbauteilfläche, die Einzahlwerte erreicht werden. Vergleichsmessungen mit dem genannten Trockenaufbau haben gezeigt, dass die Schallwerte im Trittschallbereich bei der Verwendung der richtigen Trittschalldämmplatte um bis zu 5 dB besser sind. Anhand der gezeigten Aufbauten ist ersichtlich, dass die Bauteilhöhe alleine nicht maßgebend für einen guten Schallschutz ist (Abb. 10: 34 cm = erreicht; Abb. 08: 46,5 cm = nicht erreicht), sondern der Gesamtaufbau als *Masse – Feder – Masse System* in Bezug auf die Resonanzfrequenz richtig abgestimmt werden muss.

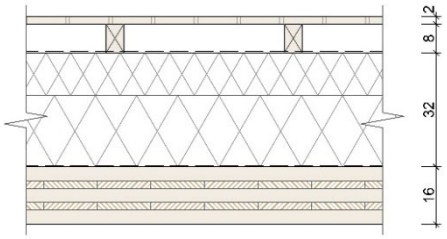
2.2. Terrassenaufbauten mit Brettsperrholz

Aufbauten für Terrassen stellen oft die größten Herausforderungen für einen ausreichenden Schallschutz dar. Einerseits muss ausreichend Dämmung verwendet werden, was oft schon durch das benötigte Entwässerungsgefälle zur Herausforderung wird. Für den für den Luft- und Trittschall, ist zusätzlich zur Holzdecke noch Masse notwendig. Dies geht dann meisten zu Lasten der Dämmstärke. Die vier Terrassenaufbauten zeigen die Schallschutzqualität von häufig verwendeten Aufbauten und was berücksichtig werden muss, um die geforderten Werte für den Schallschutz zu erreichen. In Österreich liegt die Anforderung für Schallschutz bei Terrassen $L_{nT,w} \leq 53$ dB.



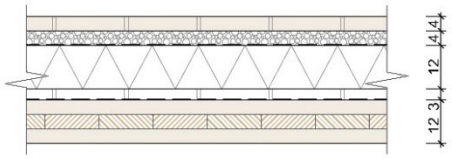
$L_{nT,w}$=59dB (nicht erfüllt); A=14m²; m'=125 kg/m²

Abbildung 11: Bauteilhöhe = 46,5 cm



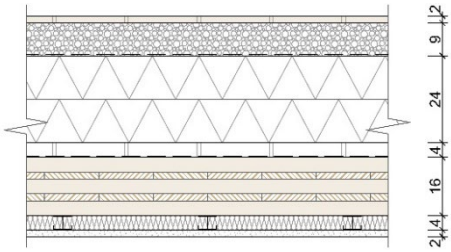
$L_{nT,w}$=54dB (nicht erfüllt); A=16m²; m'=104 kg/m²

Abbildung 12: Bauteilhöhe = 58,0 cm



$L_{nT,w}$=51dB; A=19m²; m'=281 kg/m²

Abbildung 13: Bauteilhöhe = 35,0 cm



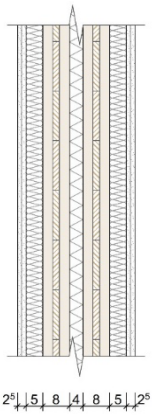
$L_{nT,w}$=37dB; A=28m²; m'=372 kg/m²

Abbildung 14: Bauteilhöhe = 61,0 cm

Die Aufbauten (Abb. 11+12) zeigen zwei häufig ausgeführte Terrassenaufbauten mit einem Holzlattenrost als Gehbelag. Bei beiden Lösungen gibt es nur eine Masse und eine Feder, d.h. für ein mehrschaliges System fehlt die zweite Masse. Beide Aufbauten erfüllen die Anforderung nicht. Bei höherer Dämmstärke (bessere Federung) ist aber ersichtlich, dass sich der Trittschallschutz etwas verbessert. Die Aufbauten (Abb. 13+14) zeigen mit welchen Lösungen der geforderte Schallschutz erreicht werden kann. Durch die Erhöhung der Masse auf der Rohdecke (z.B. Betonplatten) und durch eine zweite Masse auf der Dämmung, in Form von Kiesschüttung und eines Endbelages, kann die Schallschutzanforderung erfüllt werden. Weiters ist sichtbar, dass höhere Dämmstärken in Kombination mit den genannten Massen einen besseren Trittschallschutz bringen.

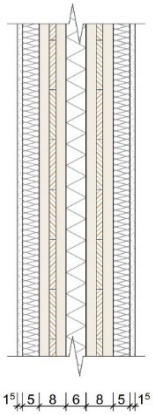
2.3. Wohnungstrennwände in Brettsperrholz und Holzrahmenbau

Beim Holzbau gilt auch für den Luftschallschutz die Mehrschaligkeit. D.h., dass es wirtschlich und ressourceneffizient gesehen nicht möglich ist, mit einer einschaligen Konstruktion den nach der OIB Richtlinie 5 geforderten Schallschutz von $D_{nT,w} \geq 55$ dB zu erreichen. Die Funktion solcher Trennwände ist vielfältig. Neben der vertikalen Lastableitung ist der Brandschutz und der Schallschutz zu berücksichtigen. Die folgenden sechs Beispiele (5 x Brettsperrholz, 1 x Holzrahmenbau) zeigen, dass es mit beiden Systemen möglich ist den geforderten Schallschutz zu erreichen. Die Einzahlwerte sind alle inklusive der Flankenübertragungen. Die Ergebnisse würden auch die Forderungen für einen erhöhten Schallschutz in Österreich erfüllen. Bei den Aufbauten (Abb. 15–17) werden zwei tragende Wandscheiben eingesetzt, die in einem Abstand von 4 bis 6 cm stehen, aber nicht miteinander verbunden sind. Der Abstand wird mit Faserdämmung ausgefüllt. Die Unterschiede der zwei Aufbauten variieren nur minimal. Entweder eine einfache oder doppelte Beplankung oder der Abstand zwischen Brettsperrholzelementen wird verändert. Bei der Wand (Abb.17) wurde nur eine Seite mit der Vorsatzschale beplant und die andere Seite das Holz sichtbar belassen. Für den Trennbauteil selber ist die zweite Vorsatzschale zum Erreichen des Schallwertes nicht notwendig, aber für Flankenübertragung in vertikaler Richtung wird diese benötigt. Weiters hängt die Schallqualität auch von den Detaillösungen zu den Decken und Wänden ab. Zum Beispiel wirken sich Plattenmaterialien mit höherer flächenbezogener Masse als Vorsatzschalen für den Schallschutz deutlich besser aus. Das sind Gründe, warum bei fast gleichen Wandelementen unterschiedliche Schallqualitäten herauskommen können. Oder mit nur einer Vorsatzschale ein besserer Schallschutz als mit zwei Vorsatzschalen erreicht wird (Abb. 17).



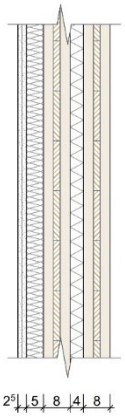
$D_{nT,w}$=65dB;A=13m²;m'=123 kg/m²

Abbildung 15: Bauteildicke 35 cm



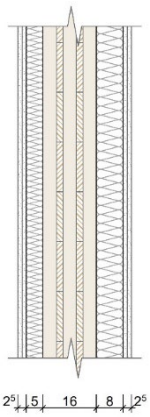
$D_{nT,w}$=66dB; A=8m²; m'=103 kg/m²

Abbildung 16: Bauteildicke 35 cm



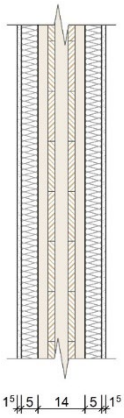
$D_{nT,w}$=72dB; A=11m²; m'=103 kg/m²

Abbildung 17: Bauteildicke 27,5cm



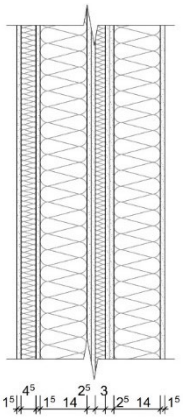
$D_{nT,w}$=65dB; A=19m²; m'=123 kg/m²

Abbildung 18: Bauteildicke 34 cm



$D_{nT,w}$=65dB; A=10m²; m'=95 kg/m²

Abbildung 19: Bauteildicke 27 cm



$D_{nT,w}$=60dB; A=9m²; m'=144 kg/m²

Abbildung 20: Bauteildicke 45 cm

Bei den Abbildungen 18+19 hat der Aufbau nur eine tragende Wand und zwei Vorsatzschalen mit unterschiedlichen Beplankungsstärken und variierenden Abständen. Der Einzahlwert der Messung ist aber gleich gut. Beim Vergleich der Messprotokolle ist aber ersichtlich, dass der Wandaufbau (Abb. 18) im tieffrequenten Bereich eine höhere Schallqualität aufweist. In der Abbildung 20 handelt es sich um eine Reihenhaustrennwand. Das Messergebnis mit 60 dB ist etwas niedriger als bei den anderen Wandaufbauten, obwohl die Wand deutlich dicker ist. Der niedrigere Wert war der Schallübertrag über die Außenwand (Fenster) geschuldet. Die Wand selber hat ein höheres Bauschalldämmmaß, aber bei einer Gesamtmessung wird die Schallqualität immer auf den schlechtesten Bauteil begrenzt.

3. Zusammengesetzte Bauteile

Bei den folgenden Darstellungen sind zwei Bauteilzusammenstellungen zu sehen, wie sie in den Projekten umgesetzt wurden. Dies ist vor allem im Holzbau wichtig, dass es viele Möglichkeiten der Bauteilverbindungen gibt. Die Bauteilzusammensetzungen zeigen mit welcher Systemvariante die angegebenen Schallschutzwerte erreicht wurden. Anders ausgedrückt, wenn die Aufbauten und die Verbindungen so ausgeführt werden, kann unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit mit der gleichen Schallqualität gerechnet werden. Wichtig zu erwähnen ist auch, dass bei den zwei Detaildarstellungen zwischen den Brettsperrholzelementen (Wand, Decke, Wand) auf allen Seiten (ober- und unterhalb der Decke) elastische Zwischenlager eingebaut wurden. Häufig wird auch die Frage gestellt, wann sollte die Trennwand mit zwei Brettsperrholzscheiben ausgeführt werden und wann reicht eine einzelne tragende Wandscheibe? Grundsätzlich kann gesagt werden, dass mit beiden Wandtypen die hohen Anforderungen des Schallschutzes erfüllt werden. Ein Grund für die Variante Abb.21 kann z.B. der Brandschutz oder eine zu geringe Auflagerfläche für

die Deckenelemente sein. Im Holzbau muss die Holzdecke im Übergang zur nächsten Nutzungseinheit im Regelfall immer getrennt werden, um die Flankenübertragung so zu reduzieren, dass der Schallschutz erreicht wird. Für die Wahl der Trennwand kann auch nachfolgendem Kriterium vorgegangen werden. Je höher die Anforderungen und je dauerhafter dieselben Personen darin wohnen, desto mehr ist die Wand mit den zwei Scheiben (Abb.21) zu bevorzugen. Diese Variante bietet etwas mehr Sicherheit und Reserve für die Qualität des Schallschutzes.

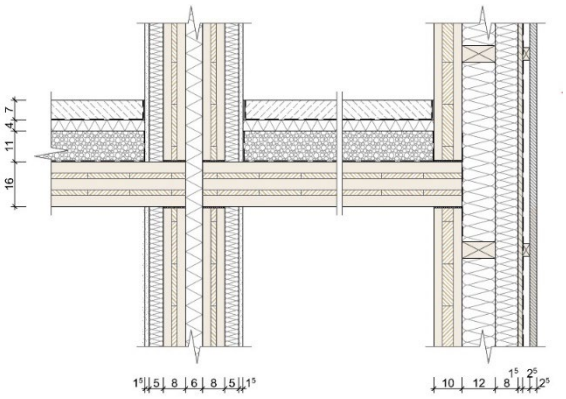


Abbildung 21: Bauteile Abb.16 + 4 + Außenwand

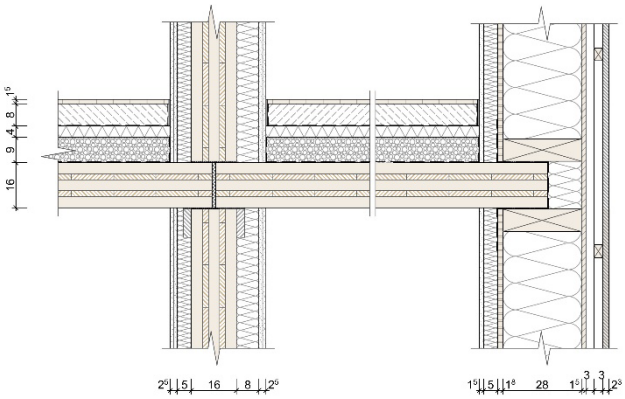


Abbildung 22: Bauteile Abb.18 + 3 + Außenwand

4. Zusammenfassung

Bauen mit Holz kann sehr vielfältig und auch sehr unterschiedlich sein. Meine bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass bei guter Planung und entsprechenden bauphysikalischen Kenntnissen zum Schallschutz, die geforderten Werte immer erreicht wurden. Die Vielzahl der gezeigten Aufbauten soll vermitteln, dass der Holzbau ausreichend Lösungen hat, die hohen Anforderungen der geltenden Vorschriften zu erreichen. Die im Holzbau verwendeten Aufbauten sind mit den Aufbauhöhen im schweren Massivbau ident. Auch der Estrich (Bodenaufbau) im Holzbau ist im Prinzip gleich aufgebaut wie z.B. im Betonbau. Die Unterschiede sind überschaubar, anstatt einer leichten Schüttung wird eine schwere Schüttung verwendet und bei der Trittschalldämmung wird etwas genauer auf die dynamische Steifigkeit geschaut. Bei den Wandaufbauten wurde nur aus vier Projekten ausgewählt, weil diese in der Zwischenzeit zu den Standardausführungen geworden sind. Wie schon erwähnt sind die Lösungen für den Schallschutz im Holzbau vorhanden und durch die maschinelle Vorfertigung exakt und schnell umsetzbar. Die Fragen die sich mir oft stellen sind: Wie kann das vorhandene Wissen zum Schallschutz im Holzbau schneller und effizienter in der Lehre, bei den Planenden und Ausführenden, bleibend, vermittelt werden? Und: Wie hoch sind die wirklichen Kosten für den Holzanteil bei einem Projekt, gesamtheitlich gesehen, im Vergleich zu den anderen Gewerken? Ökonomisch betrachtet: Was vergleichen wir?

5. Literatur

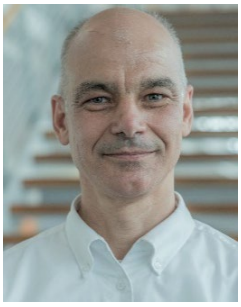
[1] OIB-Richtlinie 5: Schallschutz (Ausgabe: April 2019), online abrufbar unter https://www.oib.or.at/sites/default/files/richtlinie_5_12.04.19_0.pdf

[2] ÖNORM EN ISO 16283-1: Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau – Teil 1: Luftschalldämmung, April 2018

[3] ÖNORM EN ISO 16283-2: Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau – Teil 2: Trittschalldämmung, November 2020

Schalltechnisch optimierte Konstruktionen im Holzbau – nicht immer nur teuer!

Andreas Rabold
Technische Hochschule Rosenheim
und ift Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Adrian Blödt
IB Blödt / Blödt Holzkomplettbau GmbH
Kohlberg, Deutschland



Schalltechnisch optimierte Konstruktionen im Holzbau – nicht immer nur teuer!

1. Einleitung

Rasant steigende Baupreise führen derzeit in vielen Fällen zur Rückstellung von Bauvorhaben und zu einem starken Rückgang der Baukonjunktur. Gleichzeitig wird dringend bezahlbarer Wohnraum benötigt und politisch gefordert. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit das Einsparpotential in allen Bereichen des Bauwesens auszuschöpfen. Die steigenden Baupreise haben schon seit geraumer Zeit Auswirkungen auf die Ausnutzung des Baugrundes durch raumoptimierte Doppel- Reihen- und Mehrfamilienhäuser sowie auf die Nachverdichtung in Form von Aufstockungen und Parkplatzüberbauungen. Die momentane Entwicklung lässt aber auch die Notwendigkeit der nachzuweisenden Eigenschaften eines Gebäudes überdenken. Während die Anforderungen an die Statik und den Brandschutz nur wenig Spielraum erlauben und auch der Wärmeschutz in Zeiten des Klimawandels kaum Kompromisse zulässt, kann im Bereich der Bauakustik auf den ersten Blick ohne Gefahr für Leib, Leben und Umwelt über drastischere Maßnahmen nachgedacht werden.

Werden bestimmte Grenzen überschritten, so sind jedoch auch beim Schallschutz unmittelbare gesundheitliche Folgen für den Bewohner zu beobachten. In einer zusammenfassenden Studie des Umweltbundesamtes wird dargelegt, dass chronischer Lärm nicht nur die Lebensqualität und das subjektive Wohlbefinden auf vielen Ebenen negativ beeinflusst, sondern auch das Herz-Kreislauf-System beeinträchtigt und den Schlaf stört [1]. So bewirkt ein Anstieg des Straßenverkehrslärms um 10 dB eine Risikoerhöhung von Herzinfarkten beziehungsweise Schlaganfällen um 6 bis 15 Prozent. Erste vegetative Reaktionen werden bereits ab einem A-bewerteten Maximalschallpegel im Innenraum $L_{A,F,max}$ = 32 dB festgestellt. Die Grenze für Schlafstadienwechsel, verfrühtes Erwachen am Morgen, Bluthochdruck und Herzinfarkt beginnt bei $L_{A,F,max}$ = 35 dB bis 50 dB [2]. Die Symptome des Schlafstadienwechsels und Aufwachens treten bekannterweise auch bei Nachbarschaftslärm durch Luft- und Trittschallübertragungen der Trennwand oder -decke auf. Während bei störenden Luftschallübertragungen wie basshaltiger Musik auf die Notwendigkeit der gegenseitigen Rücksichtnahme hinzuweisen ist, ist die Verursachung von Trittschallgeräusche unvermeidbar.

Vor diesem Hintergrund erscheinen die in DIN 4109-1 angegebenen Mindestanforderungen an den Schallschutz, die den Bewohner lt. Präambel vor unzumutbaren Belästigungen schützen sollen, in einem anderen Licht. Die Anforderungen an den Schallschutz von Außenbauteilen werden nach DIN 4109-1 so ermittelt, dass ein A-bewerteter Innenpegel im Wohnraum von $L_{A,F,max}$ = 35 dB nicht überschritten wird. Für Trenndecken und -wände werden hinsichtlich der normativen Anforderungen bereits Kompromisse eingegangen, um die wirtschaftliche Ausführbarkeit der Bauteile zu berücksichtigen. Aber auch für die bei diesen Trennbauteilen maßgebliche Luft- und Trittschallübertragung aus fremden Wohnbereichen kann gezeigt werden, dass die o.g. Grenzwerte bei der Wahl geeigneter Bauteile unabhängig von der Bauweise eingehalten werden können [3],[4].

Weiterführende Zielwerte, die im Bereich des Komfortschallschutzes liegen und frei zu vereinbaren sind, können im Rahmen eines Kosten-Nutzen optimierten Bauens jedoch durchaus hinterfragt und angepasst werden, soweit dies dem Bauherrn und Bewohner nachvollziehbar vermittelt wird. Besonders hervorzuheben ist dabei eine sinnvolle Vereinbarung zum Schutz gegenüber tieffrequenten Gehgeräuschen. Nachfolgend sollen die Möglichkeiten der Kostenreduktion für Trenndecken in Holzbauweise aufgezeigt und geeignete Bauteile vorgestellt werden. Zusätzlich werden die wirtschaftlichen Vorteile einer genaueren Prognose aufgezeigt und bauseitige Einflussgrößen diskutiert.

2. Kostenreduktion für Trenndecken

2.1. Zielwerte für kostenoptimierte Trenndecken

Eine solide bauakustische Planung sollte immer mit der Festlegung sinnvoller Zielwerte für den Schallschutz beginnen. In [5] wurden hierzu für die Anwendung im Holzbau Schallschutzniveaus festgelegt und mit einer verbalen Beschreibung des zu erwartenden Schallschutzes verknüpft. Dies erlaubt dem Planer, den Bauherrn ausreichend zu informieren und ihm die Entscheidung zu überlassen, welches Niveau für das geplante Bauvorhaben sinnvoll ist.

Während der Mindestschallschutz gesetzlich bindend einzuhalten ist, können die darüber hinausgehenden Schallschutzniveaus Basis+ und Komfort vom Bauherrn und Planer festgelegt werden. Um für den Bewohner eine ausreichende Korrelation zwischen Zielwert und subjektiver Wahrnehmung der Trittschallgeräusche zu erreichen, wird bei diesen Schallschutzniveaus der Spektrumanpassungswert $C_{I,50\text{-}2500}$ für das Bauteil ohne Nebenwege berücksichtigt.

Tabelle 1: Zielwerte für Wohnungstrenndecken in Holzbauweise nach [5]

Schallschutzniveau		
BASIS (DIN 4109-1:2018)	BASIS+	KOMFORT
$R'_w \geq 54$ dB	$R'_w \geq 57$ dB	$R'_w \geq 60$ dB
$L'_{n,w} \leq 50$ dB bzw. $L'_{n,w} \leq 53$ dB[a)]	$L'_{n,w} \leq 50$ dB $L_{n,w}+C_{I,50\text{-}2500} \leq 50$ dB[b)]	$L'_{n,w} \leq 46$ dB $L_{n,w}+C_{I,50\text{-}2500} \leq 47$ dB[b)]

[a)] Temporäre Ausnahme für Leichtbaudecken nach DIN 4109-33; entfällt mit der Überarbeitung.

[b)] Bauteilwert ohne Nebenwege als Zielwert zur Auswahl einer geeigneten Decke im Bauteilkatalog

Das Schallschutzniveau BASIS+ greift für den $L'_{n,w}$ den Mindestschallschutz nach DIN 4109-1 auf und verbessert durch den zusätzlichen Zielwert ($L_{n,w}+C_{I,50\text{-}2500}$) die Planungssicherheit. Die Anhebung des Bau-Schalldämm-Maßes R'_w der Trenndecke gegenüber den Mindestanforderungen um 3 dB gewährleistet einen ausreichenden Schallschutz bei normalen Wohngeräuschen und ist im Holzbau für fast alle Bauweisen(arten) ohne Zusatzaufwand realisierbar. BASIS+ kann somit als solide Grundlage für eine wirtschaftliche Ausführung im privatrechtlichen Wohnungsbau angesehen werden.

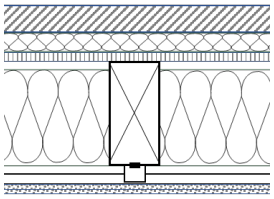
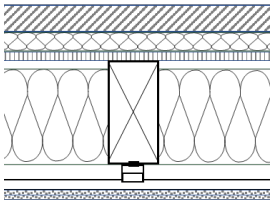
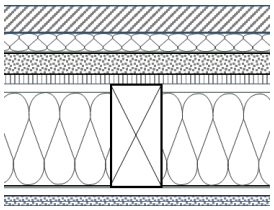
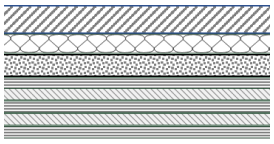
2.2. Schalltechnisch und wirtschaftlich optimierte Bauteile

Als wirtschaftlichste Lösung für Wohnungstrenndecken in Holzbauweise wird von vielen Holzbaubetrieben die Balkendecke mit abgehängter Unterdecke favorisiert. In Tabelle 2, Zeile 1 wird eine Variante für den mehrgeschoßigen Holzbau beschrieben, die bei geeigneter Ausführung der flankierenden Wände eine sichere Einhaltung aktualisierten Mindestanforderungen nach DIN 4109 gewährleistet ($L'_{n,w} \leq 50$ dB). Durch eine Optimierung der Unterdeckenabhängung erreicht der Deckentyp in Tabelle 2, Zeile 2 auch das Schallschutzniveau BASIS+ und mit weiteren Maßnahmen das Schallschutzniveau KOMFORT. Als bauakustisch relevante Größe ist bei diesen Konstruktionen die Eigenfrequenz f_0 des Unterdeckenabhängers zu berücksichtigen. Ein Auslegungsdiagramm mit Anwendungsbeispiel ist im Anhang I zu finden.

Alternativ kann auch mit einer starr montierten und dadurch weitgehend vorfertigbaren Unterdecke BASIS+ erreicht werden, wenn beispielsweise eine 60 mm Kalksplittschüttung in Pappwaben als Rohdeckenbeschwerung eingesetzt wird (Tabelle 2, Zeile 3). Werden Massivholz-Deckenelemente eingeplant, so kann Basis+ mit der gleichen Rohdeckenbeschwerung erreicht werden (Tabelle 2, Zeile 4). Für diesen Deckenaufbau sind auch die in Abschnitt 2.4 behandelten baulichen Einflussgrößen zu beachten.

Der Nachweis der Luft- und Trittschalldämmung und damit der Einhaltung der festgelegten Zielwerte kann in Zukunft durch das differenzierte Berechnungsverfahren erfolgen, das durch die Berücksichtigung sämtlicher Zusatzmaßnahmen (Installationsebenen, Zusatzbeplankungen, elastische Baulager oder flankierende C-Profil Wände) wirtschaftliche Lösungen ermöglicht.

Tabelle 2: Planungsdaten für Decken in Holzbauweise nach [5]

Schnitt, vertikal	Konstruktionsdetails	$L_{n,w}$ $L_{n,w}+C_{I,50\text{-}2500}$ in dB	R_w in dB
	50 mm Zementestrich[1)], m‘ = 120 kg/m² 30 mm MW-Trittschalldämmplatte, s‘ ≤ 8 MN/m³ 22 mm Holzwerkstoffplatte 220 mm Balken + 200 mm Faserdämmstoff 40 mm Abhänger, f_0 < 30 Hz + CD Profil 12,5 mm GKF, m‘ = 10 kg/m² 12,5 mm GKF, m‘ = 10 kg/m²	40 dB 51 dB	80 dB
	50 mm Zementestrich[1)], m‘ = 120 kg/m² 30 mm MW-Trittschalldämmplatte, s‘ ≤ 8 MN/m³ 22 mm Holzwerkstoffplatte 220 mm Balken + 200 mm Faserdämmstoff 70 mm Abhänger, f_0 < 20 Hz + CD Profil 12,5 mm GKF, m‘ = 10 kg/m² 12,5 mm GKF, m‘ = 10 kg/m²	37 dB 49 dB	82 dB
	50 mm Zementestrich[1)], m‘ = 120 kg/m² 30 mm MW-Trittschalldämmplatte, s‘ ≤ 8 MN/m³ 60 mm Kalksplitt in Pappwaben, m‘ ≥ 90 kg/m² 22 mm Holzwerkstoffplatte 220 mm Balken + 200 mm Faserdämmstoff 24 mm Lattung, Achsabstand e ≥ 400 mm 12,5 mm GKF, m‘ = 10 kg/m² 12,5 mm GKF, m‘ = 10 kg/m²	43 dB 49 dB	74 dB
	50 mm Zementestrich[1)], m‘ = 120 kg/m² 40 mm MW-Trittschalldämmplatte, s‘ ≤ 7 MN/m³ 60 mm Kalksplitt in Pappwaben, m‘ ≥ 90 kg/m² 22 mm Holzwerkstoffplatte 140 mm Massivholzdecke	40 dB[2)] 48 dB	72 dB

[1)] Zementestrich C25, ohne chemische Zusätze, Mindestdicke 50 mm

[2)] Aktuelle Baumessungen, die auf Zementestrichen mit hoher Kontaktsteifigkeit durchgeführt wurden, lassen auf einen Bauteilwert $L_{n,w}$ = 40 – 45 dB rückschließen.

2.3. Weiterentwicklung im schalltechnischen Nachweisverfahren

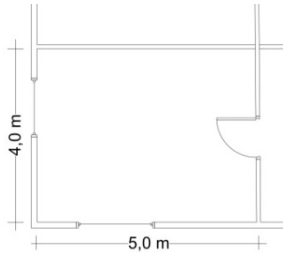
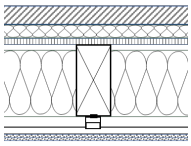
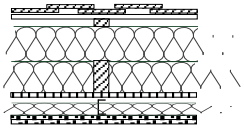
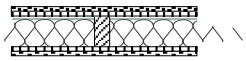
Das Nachweisverfahren für die Trittschalldämmung von Holzdecken wurde in den letzten Jahren grundlegend überarbeitet und soll nun in DIN 4109-2 übernommen werden. Die wesentliche Änderung gegenüber dem bisherigen Verfahren liegt in der differenzierten Betrachtung der Flankenübertragung. Während das derzeitige Berechnungsmodell die flankierenden Wände pauschal beurteilt, wodurch die ungünstigste Flanke für die Berechnung maßgeblich wird, können die Flanken im neuen Modell einzeln berücksichtigt werden. Das Berechnungsmodell wurde in [6],[7],[8] vorgestellt. Die dazu erforderlichen Planungsdaten können Anhang II entnommen werden.

Das neue Bemessungsverfahren führt zu wirtschaftlich vorteilhafteren Ergebnissen bei ansonsten identischer Bauweise. Durch die Integration zusätzlicher Eingangsdaten und die detaillierte Berücksichtigung jeder einzelnen Flanke im Vergleich zu den Verfahren in DIN 4109-2:2018 und DIN 4109-33:2016 ist es möglich, die Konstruktion praxisgerecht zu

gestalten. Im Hinblick auf wirtschaftliches Bauen ermöglicht die genauere Vorhersage des Norm-Trittschallpegels am Bau die Vermeidung unnötiger und kostspieliger Zusatzmaßnahmen. Zudem eröffnet das neue Verfahren die Möglichkeit zur Berücksichtigung von Vorsatzschalen und elastischen Baulagern, die bisher nicht im vereinfachten Berechnungsverfahren berücksichtigt werden konnten.

In Tabelle 3 wird dies am Beispiel einer Holzbalkendecke mit abgehängter Unterdecke gezeigt. Zum berechneten $L'_{n,w}$ wird nach DIN 4109-2 ein Sicherheitsbeiwert u_{prog} addiert, der u.a. die Prognoseunsicherheit berücksichtigt. Er wird aus der einfachen Standardabweichung zwischen Berechnung und Baumessung bestimmt. Für das neue Trittschall-Nachweisverfahren konnte dieser Sicherheitsbeiwert auf u_{prog} = 2 dB reduziert werden.

Tabelle 3: Berechnungsbeispiel mit Eingangsdaten zur Berechnung nach DIN 4109-2:2018-01 und dem neuen Verfahren für den Leichtbau

Grundriss / Anforderungen	Decke	Außenwand	Innenwand
			
	50 Zementestrich 30 MFT, s' = 8 MN/m³ 22 Holzwerkstoffplatte 220 Balken + Dämmstoff 70 Abhänger+CD-Profil 2 x 12,5 GKF	raumseitig: 13 Spanplatte 10 Luftschicht 75 CW-Profil+MF 2 x 12,5 GKF / ohne gleitenden Deckenanschluß	12,5 GKB 13 Spanplatte 100 KVH+MW 13 Spanplatte 12,5 GKB
S_S = 20 m² erf. $R'_w \geq$ 54 dB zul. $L'_{n,w} \leq$ 50 dB	R_w = 82 dB $L_{n,w}$ = 37 dB $C_{I,50\text{-}2500}$ = 12dB	l_f = 9,0 m Vorsatzschale: $\Delta R_{ij,w}$ = 17 dB (Weg DFf) $\Delta R_{j,w}$= 8,5 dB (Weg Df)	l_f = 9,0 m
Berechnung nach DIN 4109:2018-01:	$L'_{n,w}$+ u_{prog} = **48 dB** (u_{prog} = 3 dB)	Günstige Flanke wegen Vorsatzschale wird nicht berücksichtigt	ungünstigste Flanke: K_1 = 6 dB / K_2 = 2 dB
Berechnung nach dem neuen Verfahren	$L'_{n,w}$+ u_{prog} = **44,2 dB** (u_{prog} = 2 dB)	$L_{n,Df,w}$ = 33,4 dB $L_{n,DFf,w}$ = 24,5 dB	$L_{n,Df,w}$ = 38,3 dB $L_{n,DFf,w}$ = 33,5 dB

2.4. Bauseitige Einflussgrößen

Neben der Prognose der bauakustischen Eigenschaften, ist auch die Umsetzung der geplanten Maßnahmen von großer Bedeutung. Je nach gewähltem System können dabei Standard- oder Sonderkonstruktionen zum Einsatz kommen. Einfache und bewährte Konstruktionen verringern das Risiko von Baufehlern signifikant und reduzieren die Baukosten. Neben klassischen Baufehlern sind auch Materialschwankungen und Veränderungen der Materialzusammensetzung als bauseitige Einflussgrößen auf die Luft- und Trittschalldämmung der Trennbauteile zu nennen. Nachfolgenden sollen einige Beispiele aus der Praxis angeführt werden, die bauseitige Einflussgrößen und potentielle Fehlerquellen exemplarisch darstellen.

Bauakustische Fehler bei der Ausführung oder Montage

Die Schallbrücke am Estrichrand ist wohl der bekannteste Baufehler bei Deckenkonstruktionen im Massiv- und Holzbau. Dennoch ist es auch bei aktuellen Bauvorhaben nicht ungewöhnlich, dass ein frühzeitig oder zu kurz abgeschnittener Randdämmstreifen zu einer deutlichen Erhöhung des Trittschallpegels führt. Abbildung 1 veranschaulicht den

Einfluss einer Schallbrücke am Estrichrand im Vergleich zu einer Auswahl von Messungen an fehlerfreien Decken. Ursache der Schallbrücke sind häufig Ausgleichsmassen für die Bodenverlegearbeiten, die einen vorzeitig abgeschnittenen Randdämmstreifen überbrücken. Typischer-weise führt dies zu einer Erhöhung des Norm-Trittschallpegels bei ca. 2000 Hz, wie in Abbildung 1 dargestellt.

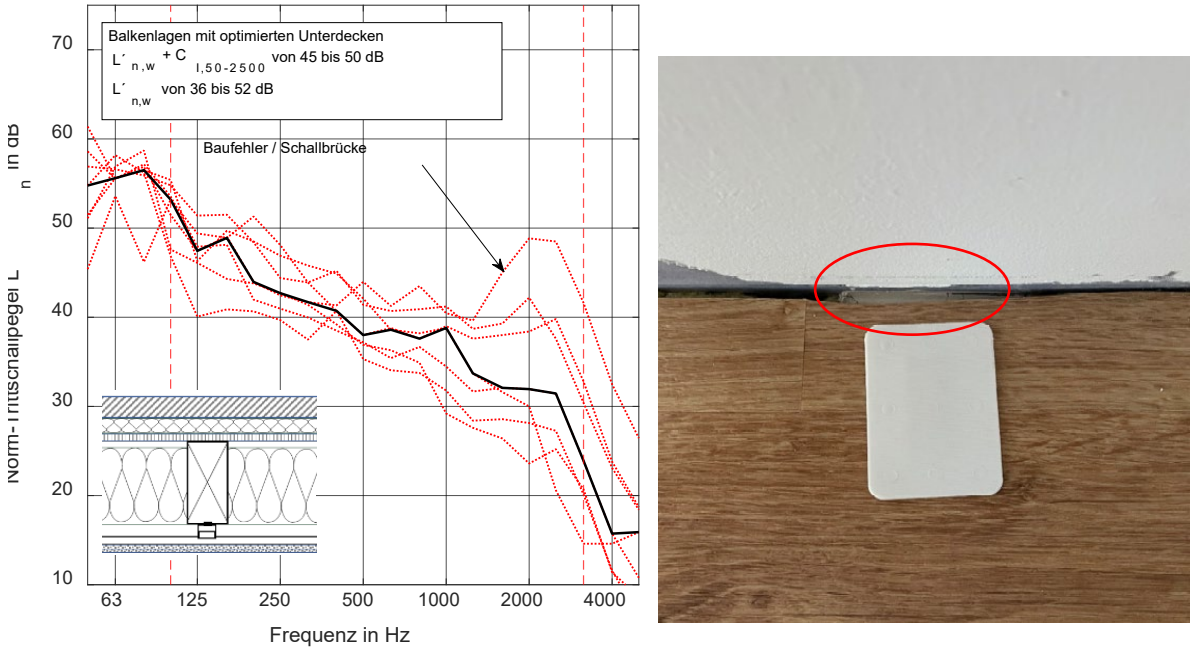


Abbildung 1: Norm-Trittschallpegel L'_n verschiedener Balkenlagen mit optimierten Unterdecken in der Bausituation. Hervorgehobene Kurve mit «Schallbrücke» am Randdämmstreifen.

Die Überbrückung schalltechnisch erforderlicher Entkopplungen kommt auch bei Massivholzbauten häufig vor. In der Planung von Massivholzkonstruktionen werden oft elastische Zwischenlagen im Stoßbereich zwischen Decke und Wand eingesetzt. Um die Effektivität dieser elastischen Zwischenlagen nicht zu beeinträchtigen, ist es entscheidend, dass die Verbindungselemente (typischerweise Winkel) ebenfalls eine elastische Entkopplung aufweisen. Hierfür stehen Planungsdaten zur Verfügung, die für eine Vorhersage genutzt werden können. Während der Montage besteht jedoch das Risiko, dass durch übermäßiges Anziehen der Verbindungselemente die schalldämmende Wirkung reduziert wird. Dadurch kommt es zu einer Reduktion der Verbesserung von bis zu 10 dB. Um diesem Effekt vorzubeugen, sind für die «elastischen Verbindungsmittel» Montageschablonen erhältlich, welche ein «Überdrehen» der Schrauben verhindern. Wird dieser Aspekt nicht berücksichtigt, wird jede Prognose obsolet.

Steifigkeit der Rohdeckenbeschwerung Bindemittel in Schüttungen

Über Jahrzehnte hinweg hat sich die Praxis bewährt, Holzdecken mit einer Rohdeckenbeschwerung auszustatten, um die Übertragung von Trittschall zu reduzieren. In den letzten Jahren hat die Verwendung von Rohdeckenbeschwerungen auf Massivholzdecken erheblich zugenommen. Bei diesen Deckensystemen wird eine Rohdeckenbeschwerung von ≥ 90 kg/m² als bauakustische Mindestmaßnahme betrachtet. Bisher war die flächenbezogene Masse das entscheidende Kriterium für die Auswahl der Rohdeckenbeschwerung. Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass neben der Masse auch die Steifigkeit der Beschwerungsschicht eine bedeutende Rolle spielt [9]. Üblicherweise werden Rohdeckenbeschwerungen mit Schüttungen aus Splitt realisiert. Um die Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten, wird die Schüttung in der Lage gesichert. Hierbei kommen entweder mechanische Systeme wie Lattenroste/Pappwaben oder chemische Bindemittel wie Latexmilch oder Zement zum Einsatz. Insbesondere bei chemischen Bindemitteln ist zu beachten, dass sowohl die Steifigkeit der Bindemittel selbst, als auch ihre Dosierung die Gesamtsteifigkeit der Schicht beeinflussen. In Abbildung 2 wird der Vergleich des Norm-Trittschallpegels zwischen einer Massivholzdecke mit einer im Lattenraster gesicherten Schüttung und einer mit zementgebundener Schüttung dargestellt. Es wird deutlich, dass die hohe Steifigkeit der Zementbindung die Trittschallpegel bei Frequenzen ab ca. 250 Hz

deutlich erhöht. Die Auswahl des Bindemittels kann bereits in der Planungsphase festgelegt werden. Die richtige und idealerweise minimale Dosierung hingegen wird während der Ausführung auf der Baustelle vorgenommen. Bei mechanisch gebundenen Systemen entfällt der Dosierungsschritt vollständig, wodurch eine versehentliche Erhöhung der Steifigkeit und die damit negativen Auswirkungen auf die Trittschallübertragungen vermieden wird.

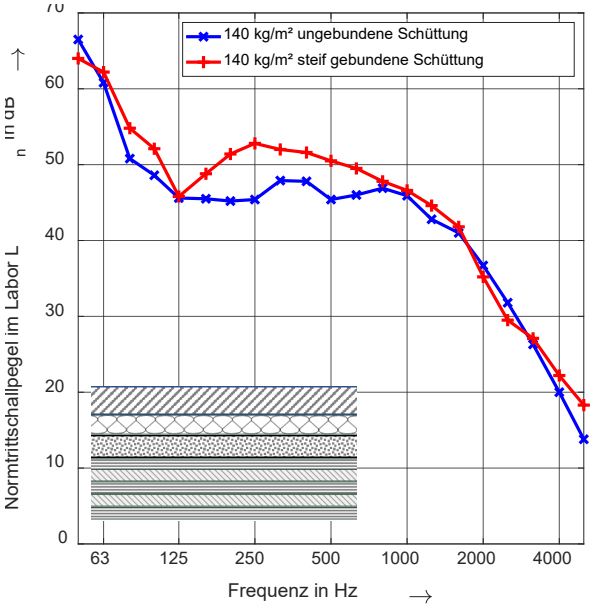


Abbildung 2: Vergleich der von Massivholzdecken mit Rohdeckenbeschwerungen 140/m² als Schüttung / blau: ohne Bindemittel / rot: mit mineralischem Bindemittel

Dynamische Steifigkeit der Trittschalldämmplatten

Ein weiterer bedeutender Faktor, der die Trittschallminderung maßgeblich beeinflusst, ist die dynamische Steifigkeit der Trittschalldämmplatten. Im Bereich des Geschoßwohnungsbaus haben sich Mineralfaserdämmplatten als gängiger Standard bei Massivholzdecken etabliert. Der Dämmstofftyp und die dynamische Steifigkeit der Herstellerangabe muss der Vorgabe des gewählten Deckenaufbaus im Bauteilkatalog entsprechen. Werden die bei den Massivdecken üblichen EPS-Dämmsysteme mit einer dynamischen Steifigkeit von $s' \geq 20$ MN/m³ verwendet, können die Zielwerte nicht erreicht werden.

Bei Baustellenmessungen ist zu beobachten, dass auch Ungenauigkeiten bei der Verlegung die Eigenschaften der Trittschalldämmung beeinflussen können. Eine lückenfreie Verlegung der Dämmplatten ist Voraussetzung für Ihre Wirksamkeit. Aber auch größere Unebenheiten in der Fläche führen zu unterschiedlichen Pressungen und zu unterschiedlichen Materialstärken des Estrichs.

Bei Materialprüfungen zur dynamischen Steifigkeit im Labor wird zunehmend beobachtet, dass Änderungen in der Materialzusammensetzung und dem Bindemittel zur Unregelmäßigkeiten der Plattendicke und örtlichen Unterschieden der Steifigkeit führen, die bereits optisch und haptisch feststellbar sind. Dieser Aspekt wird bisher in der Praxis nur wenig beachtet, kann jedoch erhebliche Auswirkungen auf die bauakustische Qualität haben.

Mechanische Eigenschaften des Estrichs

Der in der Regel verwendete schwimmende Estrich kann physikalisch, als Masse-Feder-Masse-System betrachtet werden. Die Eigenschaften der Feder, hier die Trittschalldämmung, wurden im vorherigen Abschnitt bereits kurz erläutert. Doch auch die elastomechanischen Eigenschaften der Masse, also des Estrichs, spielen eine entscheidende Rolle. Baustellenmessungen zeigen, dass eine Erhöhung der Oberflächenhärte und der Kontaktsteifigkeit des Estrichs mit einer Zunahme des Trittschallpegels bei hohen Frequenzen einhergeht. Daher ist es ratsam, auf Zusätze zu verzichten, die die Festigkeit und/oder Oberflächenhärte des Estrichs erhöhen. Es besteht noch Forschungsbedarf, um genaue mechanische Grenzwerte zu bestimmen.

Notwendige Beplankungslagen

Im Bereich des Geschoßwohnungsbaus sind neben den bauakustischen Eigenschaften auch die brandschutztechnischen Anforderungen an die Bauteile von entscheidender Bedeutung. Dabei werden die Bauteile in der Regel mit brandschutzwirksamen Gipsbekleidungen versehen. Gemäß der MusterHolzBauRL war bisher für die Gebäudeklasse 4 mindestens eine Bekleidung mit 2 x 18 mm Gips vorgesehen, was die Standardausführung darstellt. In der Praxis wurden üblicherweise 2 x 18 mm Gipskartonfeuerschutz- oder Gipsfaserplatten an der Unterseite der Decken angebracht.

Bei den bereits diskutierten Massivholzdecken könnte man annehmen, dass durch die zusätzlichen Gipslagen (was eine Erhöhung der Masse bedeutet) eine Reduzierung des Norm-Trittschallpegels zu erwarten ist. Doch auch hier spielen die Eigenschaften der Platten eine entscheidende Rolle. Eine Direktbeplankung mit 2 x 18 mm Gipskartonfeuerschutzplatten führt im Bereich der Koinzidenzgrenzfrequenz (ca. 1600 Hz) zu einer erhöhten Schallübertragung. Baustellenmessungen zeigen, dass durch die Verwendung von unterschiedlichen Beplankungslagen oder Beplankungen geringerer Dicke (und höherer Koinzidenzgrenzfrequenz) bessere Ergebnisse erzielt werden können.

Wie Abbildung 3 zeigt, werden die besten Ergebnisse mit Massivholzdecken ohne weitere Beplankung erzielt.

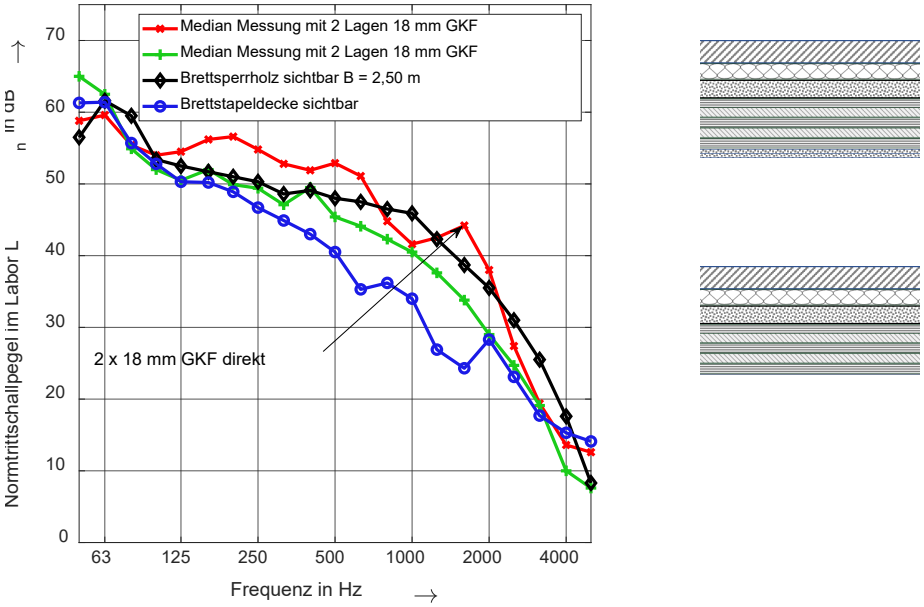


Abbildung 3: Norm-Trittschallpegel von Massivholzdecken mit Rohdeckenbeschwerung bei verschiedenen unterseitigen Oberflächenqualitäten: Direkt beplankt oder sichtbar Holzoberfläche

Auch bei Labormessungen konnte bei geeigneter Wahl der Beplankung lediglich eine Gleichwertigkeit gegenüber der Ausführung ohne Beplankung erreicht werden. Die Ausführung der unbeplankten Decke ist gemäß der MusterHolzBauRL als Sonderregelung (zusätzliche Anforderung an die Oberflächen der Wände des Raums) zulässig. Das bedeutet, dass eine bessere akustische Wirksamkeit mit weniger oder gar keiner Beplankung erreicht werden kann, als im Vergleich mit zusätzlichen steifen Beplankungslagen. Dadurch lassen sich auch wirtschaftliche Potentiale ausschöpfen.

Einfluss der Raumvolumens auf den Norm-Trittschallpegel

Die Anforderungen an die Trittschalldämmung werden in DIN 4109-1 durch den zulässigen bewerteten Norm-Trittschallpegel zul. $L'_{n,w}$ inklusive Nebenwege festgelegt. Die Definition des Norm-Trittschallpegels geht dabei von einer Prüfgröße aus, die unabhängig vom Prüfraumvolumen auf eine Bezugsabsorption A_0 = 10 m² normiert wird. Rückmeldungen von Prüfstellen weisen allerdings auf eine Abhängigkeit des $L'_{n,w}$ vom Prüfraumvolumen hin, wodurch bei Baumessungen in sehr großen Räumen deutlich zu hohe Werte für den $L'_{n,w}$ ermittelt werden [13],[14].

Im Entwurf der neuen DEGA Richtlinie 103 [12] wird dem Rechnung getragen, indem die Anforderungen, wie in etlichen anderen europäischen Ländern auch, über den $L'_{nT,w}$ festgelegt werden können, der den Trittschallschutz für den Bewohner zutreffender beschreibt. Der Nachweis kann dann nach DIN 4109-2 über den $L'_{n,w}$ erfolgen. Die Umrechnung der beiden Größen wird mit einem maximalen Volumen von 60 m³ durchgeführt, wodurch auch die Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Baumessungen in großen Räumen deutlich verbessert wird.

Insgesamt stellt dies eine Vorgehensweise dar, die sowohl der Wahrnehmung des Bewohners besser entspricht als auch wirtschaftliche Deckenaufbauten ermöglicht. Sie sollte deshalb zumindest für die Festlegung von Zielwerten, die über die Mindestanforderungen hinaus gehen, bezüglich ihrer Anwendbarkeit in der Praxis näher betrachtet werden

2.5. Weitere Entwicklungsmöglichkeiten

Mit dem Fokus auf möglichst wirtschaftliches Bauen wurden in den letzten Jahren verstärkt hybride Bauweisen ausgeführt. Eine Ausführungsvariante der hybriden Bauweise ist die Kombination massiver Decken (Hohlkörperdecken aus Beton) mit Wänden in Massivholz- oder Holztafelbauweise. Da für diese Bauweise bislang nur wenig Erfahrungswerte vorliegen, wurden ergänzende Labor- und Baumessungen durchgeführt. Die so ermittelten Planungsdaten werden derzeit für die praktische Anwendung zusammengestellt [11].

Eine weitere Bauweise, die in Bezug auf kurze Bauzeit und wirtschaftliche Ausführung Beachtung findet, ist die Modulbauweise. Auch hier waren auf Grund der speziellen Trennbauteile und Bauteilstöße Untersuchungen zur Luft- und Trittschallübertragung der Trennbauteile, sowie der Wirksamkeit elastischer Baulager und dem Einfluss der Verbindungsmittel erforderlich. Diese Untersuchungen finden in einem derzeit laufenden Projekt statt, dessen Ergebnisse zur Übernahme in DIN 4109-33 bereitgestellt werden sollen. Erste Messergebnisse zeigen, dass bei geeigneter Ausführung der Moduldecken auch ein stark reduzierter Estrichaufbau möglich ist.

3. Fazit

Wenngleich die bauakustische Planung Spielraum für kostensparende Ausführungen lässt, ist die Einhaltung eines sinnvollen Schallschutzes für die Erhaltung der Gesundheit der Bewohner und damit auch des Gebäudewertes unerlässlich. Zielwerte für kostenoptimierte Ausführungen können aufgezeigt und mit geeigneten Bauteilen hinterlegt werden.

Deutliche Einsparungen sind auch durch die genaueren Berechnungsansätze im neuen Luft- und Trittschallnachweis zu erwarten. Neben den genaueren Berechnungsmodellen sind jedoch auch die Schwankungen der Eingangsgrößen und der baulichen Ausführung von großer Relevanz. Hier haben sich in jüngerer Vergangenheit Änderungen in der Estrichausführung, der Eigenschaften der Trittschalldämmplatten sowie der Bindemittel für die Rohdeckenbeschwerungen gezeigt, die genauer zu untersuchen sind, um eine gleichbleibende Qualität der Ausführung zu gewährleisten.

Weitere Impulse für wirtschaftliches Bauen werden durch hybride Bauweisen sowie den Holzmodulbau gegeben. Diese sollten weiter verfolgt werden, um dem Ziel eines finanzierbaren Wohnraumes näher zu kommen.

4. Literatur

[1] Wothge, J., Die körperlichen und psychischen Wirkungen von Lärm
Physical and mental effects of noise, Umweltbundesamt, 2016

[2] WHO – World Health Organization (2009):
Night noise guidelines for Europe. Copenhagen.

[3] Rabold, A., Planungs- und Nachweisverfahren von Holzdecken unter Berücksichtigung der tieffrequenten Trittschallübertragung, Tagungsband DAGA 2020

[4] Rabold, A., Marxt, M., Schanda U., Geeignete Beurteilungsgrößen für die Luftschalldämmung von Haustrennwänden. – Bewertung der Schalldämmung bei üblichen Wohngeräuschen, Bauphysik 45, 2023, S. 21-34

[5] Blödt, A., Rabold, A., Halstenberg, M., Ecker, T., Huber, A., Huissel, L., Löffler, S., Scheuerpflug, M., Schallschutz im Holzbau – Grundlagen und Vorbemessung, holzbau handbuch, REIHE 3, TEIL 3, FOLGE 1, Holzbau Deutschland-Institut e.V., 2019

[6] Rabold, A., Châteauvieux-Hellwig, C., Mecking, S., Optimierung von Holzdecken in Bezug auf die DIN 4109, Tagungsband HolzBauSpezial Bauphysik 2017, Bad Wörishofen

[7] Rabold,A., Schneider,M., Fischer, H.M., Zeitler, B.,
Neue Berechnungsverfahren zur Trittschallübertragung, Bauphysik 4, 2020, S. 160 – 172

[8] Blödt, A., Schallschutz im Holzbau – Differenzierte Flankenbewertung bei der Trittschallübertragung, holzbau handbuch, REIHE 3, TEIL 3, FOLGE 2, Holzbau Deutschland-Institut e.V., 2020

[9] Blödt, A., Höller, C., Schneider, M.: Kenngrößen elastisch gebundener Schüttungen auf Decken in Holzbauweisen, Fortschritte der Akustik – DAGA 2022

[10] Rabold, A., Schödel, B., Schanda, U., Schalltechnische Optimierung von Unterdeckenabhängern, DAGA Tagungsband,2019

[11] Blödt, A., Schneider, M., Rabold, A., Bauakustik im Hybridbau, Luft- und Trittschallschutz von Gebäuden mit Wänden in Holzbauweise und Decken in Massivbauweise, holzbau handbuch, Holzbau Deutschland-Institut e.V., In Bearbeitung

[12] DEGA-Richtlinie 103-1:2023-05 «Schallschutz im Wohnungsbau Teil 1: Schallschutzklassen und erhöhter Schallschutz», Entwurf Mai 2023

[13] Schmitz, A., Interpretation von Schalldämmkurven Teil II,
VMPA Informationsveranstaltung 2018

[14] Wolf, M., Massivholzdecken, Einfluss der Spannweiten,
VMPA Informationsveranstaltung 2023

Anhang I: Planungsbeispiel Unterdeckenabhänger

- Um eine gute Entkopplung zu gewährleisten, sollte nicht mehr als die konstruktiv erforderliche Anzahl an Abhängepunkten ausgeführt werden.
- Wird für die Eigenfrequenz f_0 eines Unterdeckenabhängers ein Zielwert vorgegeben, kann der Abhänger in Abhängigkeit der Masse pro Abhänger ausgewählt werden.

Planungsbeispiel:
- Dachaufbau nach Tabelle 1, Zeile 2, Unterdecken-beplankung aus 2 x 12,5 mm GKF, m‘ = 2 x 10 kg/m²
- Fläche der Unterdecke: 20 m²
- Konstruktiv notwendige Anzahl der Abhänger: 75 Stk. (ermittelt aus max. Abständen und Randabständen)

Masse pro Abhänger:
m = (2 x 10 kg/m² x 20 m²) / 75 Abhänger = 5,3 kg/Abhänger

Eigenfrequenz der Abhänger:
Überprüfung der Eigenfrequenz der Abhänger anhand von Herstellerangaben.

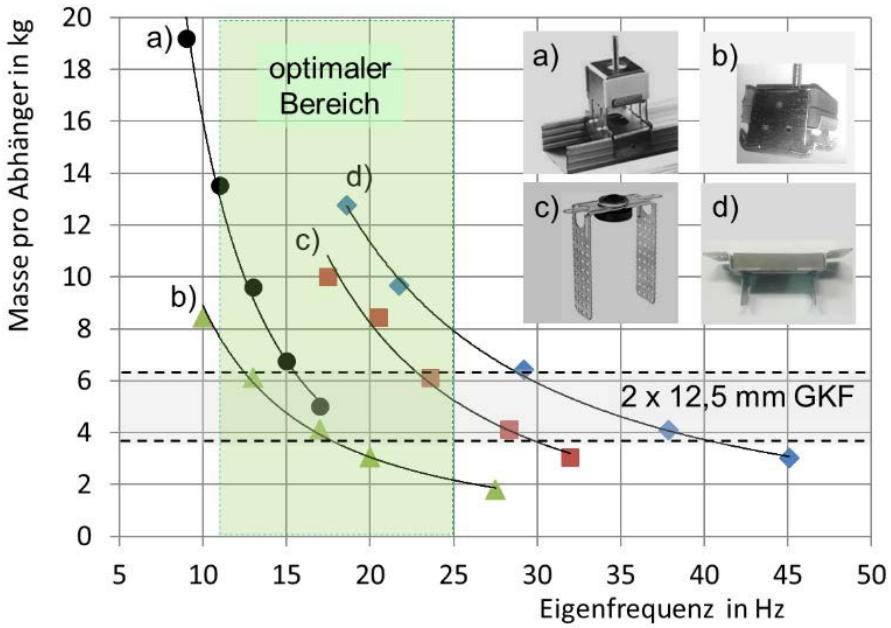
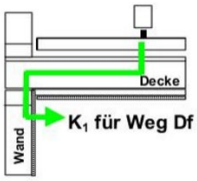
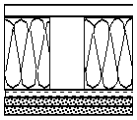
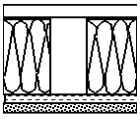
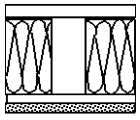
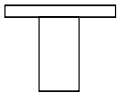
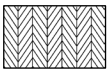
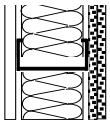
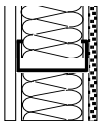
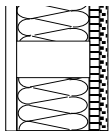
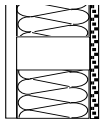
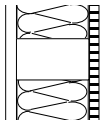
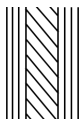


Abbildung 4: Eigenfrequenz unterschiedlicher Unterdeckenabhänger in Abhängigkeit der Belastungsmasse in kg/Abhänger. Grün hinterlegt: Optimaler Bereich der Eigenfrequenz f_0: 12 Hz ≤ f_0 ≤ 25 Hz. Grau hinterlegt: Typischer Belastungsbereich der Abhänger für eine Unterdeckenbekleidung aus 2 x 12,5 mm GKF [10].

Anhang II: Aktualisierte Planungsdaten Flankenübertragung bei Trittschallanregung

Tabelle 4: Korrektursummand K_1 für Übertragungsweg Df

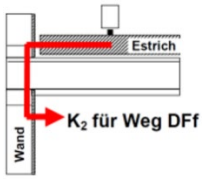
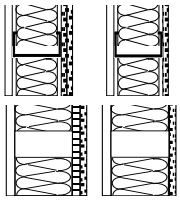
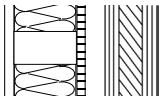
Spalte	1		2	3	4	5	6
Zeile	 Wandaufbau (Beplankung) im Empfangsraum:		Deckenaufbau (Unterdecke):  entkoppelte Unterdecke mit 2 x GK	 entkoppelte Unterdecke mit 1 x GK	 GK-Lattung oder direkt beplankt	 offene HBD	 MHD oder HKD
1		CW-Profil 2 x GK oder 2 x GF	K_1 = 4 dB	K_1 = 2 dB	K_1 = 1 dB		
2			K_1 = 2 dB[a]	-	-		
3		CW-Profil 1 x GK oder 1 x GF	K_1 = 5 dB	K_1 = 3 dB	K_1 = 1 dB		
4			K_1 = 2 dB[a]	-	-		
5		GK + HW oder 2 x GK oder 2 x GF	K_1 = 6 dB	K_1 = 3 dB	K_1 = 1 dB		
6		1 x GK oder 1 x GF	K_1 = 7 dB	K_1 = 4 dB	K_1 = 1 dB		
7		HW SP	K_1 = 9 dB	K_1 = 5 dB	K_1 = 3 dB		
8		HW OSB	K_1 = 11 dB	K_1 = 6 dB	K_1 = 3 dB		
9		Holz- oder HW- Element	-	-	K_1 = 4 dB		

GK 9,5 mm bis 18 mm Gipsplatte, mechanisch verbunden
GF 10 mm bis 18 mm Gipsfaserplatte, mechanisch verbunden
HW 12 mm bis 19 mm Holzwerkstoff- Platte, mechanisch verbunden
SP 13 mm bis 19 mm Spanplatte, mechanisch verbunden
OSB 12 mm bis 15 mm Verlegeplatten aus gerichteten Holzspänen, mech. Verbunden

Holz- oder. HW-Element	Massivholzelemente mit m' ≥ 36 kg/m² oder 80-100 mm Holzwerkstoffplatte mit m' ≥ 50 kg/m²
entkoppelte Unterdecke	Unterdecke mit Federschienen oder Unterdeckenabhängern
GK-Lattung oder direkt	Holzbalkendecke mit Unterdecke an Lattung oder GKP + HW direkt montiert
offene HBD	Holzbalkendecke mit sichtbarer Balkenlage
MHD o. HKD	Brettstapel-, Brettschichtholz- Brettsperrholz- oder Hohlkastendecke

Anmerkugen:
[a] Befestigung der Metallständerwand an der Unterdecke

Tabelle 5: Korrektursummand K_2 und bewerteter Norm-Flanken-Trittschallpegel $L_{n,DFf,w}$ zur Berücksichtigung der Flankenübertragung auf dem Weg DFf.

Spalte	1	2	3																4
Zeile	 Wandaufbau	Estrichaufbau	Trittschallübertragung auf dem Weg Dd + Df : $L_{n,w} + K_1$ in dB[a]																$L_{n,DFf,lab,w}$ in dB[b]
			40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	≥ 55	
1	 Nach Tabelle 4, Zeile 1 bis 6	I	5	5	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	0	0	44
2			4	4	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	42 [c]
3		II	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	40
4			2	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37 [c]
5		III	2	2	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	38
6			2	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37 [c]
7	 Nach Tabelle 4, Zeile 7 bis 9	I	7	6	5	5	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	46
8		II	6	5	5	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	0	45
9		III	4	4	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	42

Estrichaufbau:

I mineralisch gebundener Estrich auf Holzfaser- Trittschalldämmplatten,
Randdämmstreifen: Mineralwolle- oder PE-Randdämmstreifen, d > 5 mm
Gussasphaltestrich auf Holzfaser- Trittschalldämmplatten,
Randdämmstreifen: Mineralwolle- Randdämmstreifen, d > 5 mm

II mineralisch gebundener Estrich auf Mineralwolle oder EPS- Trittschalldämmplatten,
Randdämmstreifen: Mineralwolle- oder PE-Randdämmstreifen, d > 5 mm
Gussasphaltestrich auf Blähperlit/Mineralwolle,
Randdämmstreifen: Mineralwolle- Randdämmstreifen d > 5 mm

III Fertigteilestrich auf Mineralwolle- , EPS- oder Holzfaser- Trittschalldämmplatten,
Randdämmstreifen: Mineralwolle- Randdämmstreifen d > 5 mm

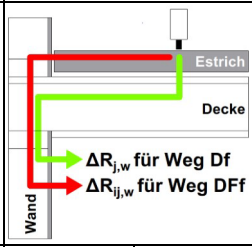
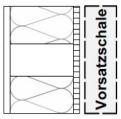
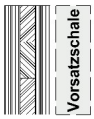
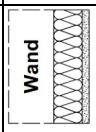
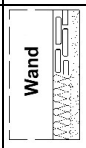
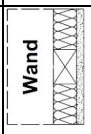
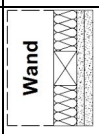
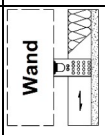
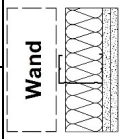
Anmerkungen:

[a] Für Konstruktionen mit $L_{n,w} + K_1 < 40$ dB oder unterschiedlich ausgeführten flankierenden Wänden ist das detailliertere Berechnungsmodell anzuwenden.

[b] $L_{n,DFf,lab,w}$ bezogen auf $S_{i,lab} = l_0\, l_{ij,lab}$

[c] Flankierende Wand doppelt beplankt nach Tabelle 4, Zeile 1, Zeile 2 oder Zeile 5

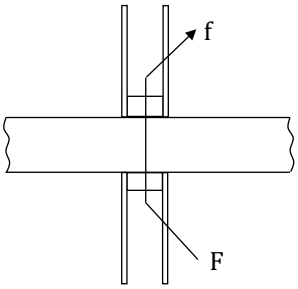
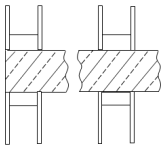
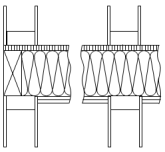
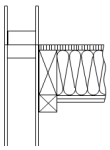
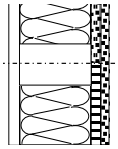
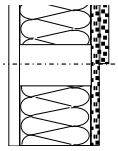
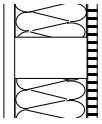
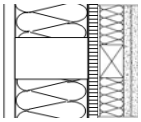
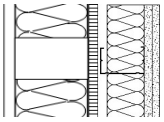
Tabelle 6: Reduzierung der Trittschallübertragung durch raumseitige Vorsatzschalen an den flankierenden Wänden.

Spalte	1		2	3
Zeile			**Wandtyp**	
			Holztafelbauwand  Nach Tabelle 4, Zeile 7 oder 8	**Massivholzwand**  Nach Tabelle 4, Zeile 9
1		50 WF 12,5 GK	$\Delta R_{j,w}$ = 3 dB[a] $\Delta R_{ij,w}$ = 6 dB[b]	-
2		27 FS 12,5 GK	Wand ohne OSB Beplankung: $\Delta R_{j,w}$ = 5 dB[a] $\Delta R_{ij,w}$ = 10 dB[b]	27 mm FS + 30 mm WH gepresst: $\Delta R_{j,w}$ = 4 dB[a] $\Delta R_{ij,w}$ = 8 dB[b]
3		40 L-v + WH 12,5 GK	$\Delta R_{j,w}$ = 2,5 dB[a] $\Delta R_{ij,w}$ = 5 dB[b]	-
4		40 L-v + WH 12,5 GK 12,5 o. 15 GK	$\Delta R_{j,w}$ = 3,5 dB[a] $\Delta R_{ij,w}$ = 7 dB[b]	$\Delta R_{j,w}$ = 3,5 dB[a] $\Delta R_{ij,w}$ = 7 dB[b]
5		65 EA + 40 L + WH 12,5 GK	Lattung horizontal: $\Delta R_{j,w}$ = 4,5 dB[a] $\Delta R_{ij,w}$ = 9 dB[b]	Lattung vertikal: $\Delta R_{j,w}$ = 7 dB[a] $\Delta R_{ij,w}$ = 14 dB[b]
6		10 LS 75 CW + WH 2 x 12,5 GK	Gleitender Deckenanschluss:	$\Delta R_{j,w}$ = 12,5 dB[a] $\Delta R_{ij,w}$ = 25 dB[b]
7			Starrer Deckenanschluss: $\Delta R_{j,w}$ = 8,5 dB[a] $\Delta R_{ij,w}$ = 17 dB[b]	$\Delta R_{j,w}$ = 8,5 dB[a] $\Delta R_{ij,w}$ = 17 dB[b]

GK	Gipsplatte
FS	Vorsatzschale mit Federschiene
WF	Holzfaserdämmstoff
WH	Faserdämmstoff zur Hohlraumbedämpfung, Anwendungstyp WH
L-v+WH	Lattung vertikal, auf dem Ständer montiert, e = 0,625 m + 40 mm Faserdämmstoff
EA+L+WH	Metallprofil mit elastischen Formteil zur akustischen Entkopplung, Lattung, e = 0,5 m + 40 mm Faserdämmstoff
LS	Luftschicht
CW + WH	C-Wandprofil + 60 mm Faserdämmstoff
a	Reduzierung der Trittschallübertragung um $\Delta R_{j,w}$ für den Weg Df bei der angegebenen Holztafel- oder Massivholzwand. Voraussetzung: Montage der Vorsatzschale an der flankierenden Wand im Empfangsraum.
b	Reduzierung der Trittschallübertragung um $\Delta R_{lj,w}$ für den Weg DFf bei der angegebenen Holztafel- oder Massivholzwand. Voraussetzung: Montage der Vorsatzschalen an den flankierenden Wänden im Sende- und Empfangsraum.

Anhang II: Aktualisierte Planungsdaten Flankenübertragung bei Luftschallanregung

Tabelle 7: Bewertete Norm-Flankenschallpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ von Holztafelwänden bei vertikaler Schallübertragung auf Stahlbeton-, Holzbalken- oder Massivholzdecken

Spalte	1	2	3	4
Zeile	 Wandaufbau (Beplankung) der flankierenden Wand:	Ausführung des Bauteilstoßes: Decke / Wand		
				
		Stahlbetondecke [a], m‘ ≥ 350 kg/m²	Holzbalken- oder Massivholzdecke	Holzbalken- oder Massivholzdecke
		Wand durch Decke unterbrochen	Wand durch Decke unterbrochen	Wand auf Deckenhöhe gestoßen
1	 HW + GK oder 2 x GK oder 2 x GF Jeweils mit $f_c \geq 2500$ Hz [b]	$D_{n,f,w}$ = 76 dB	$D_{n,f,w}$ = 67 dB	$D_{n,f,w}$ = 54 dB
2	 1 x GK oder 2 x GK 1 x GF oder 2 x GF Jeweils mit $f_c \geq 1600$ Hz	$D_{n,f,w} \geq 64$ dB	$D_{n,f,w}$ = 64 dB	-
3	 1 x HW $f_c \geq 1600$ Hz	$D_{n,f,w} \geq 60$ dB	$D_{n,f,w}$ = 60 dB	$D_{n,f,w}$ = 51 dB
4	 Vorsatzschale verbunden [c]	$D_{n,f,w} \geq 66$ dB	$D_{n,f,w}$ = 66 dB	-
5	 Vorsatzschale entkoppelt oder freistehend [d]	$D_{n,f,w} \geq 73$ dB	$D_{n,f,w}$ = 73 dB	$D_{n,f,w}$ = 64 dB [e]

GK 9,5 mm bis 18 mm Gipsplatte, mechanisch verbunden

GF 10 mm bis 18 mm Gipsfaserplatte, mechanisch verbunden

HW 12 mm bis 19 mm Holzwerkstoff- Platte, mechanisch verbunden

Anmerkungen:

[a] Für m‘ < 350 kg/m² können die Werte aus Spalte 3 verwendet werden.

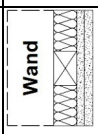
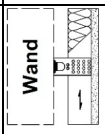
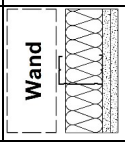
[b] Für HW: $f_c \geq 1600$ Hz

[c] Ausführung der Vorsatzschale nach Tabelle 6, Zeile 1 oder 4

[d] Ausführung der Vorsatzschale nach Tabelle 6, Zeile 5, 6 bzw. 7

[e] Wandbeplankung der Grundwand aus HW + GK

Tabelle 8: Verbesserung der Schalldämmung $\Delta R_{i,w}$ durch eine raumseitige Vorsatzschale an der flankierenden Massivholzwand (Bauteil i) bei vertikaler Schallübertragung.

Spalte	1	2
Zeile	**Vorsatzschale**	**Verbesserung der Flankendämm-Maße**
1	 27 FS 30 mm WH gepresst 12,5 GK	$\Delta R_{i,w}$ = 6 dB
2	 40 L-v + WH 12,5 GK 12,5 o. 15 GK	$\Delta R_{i,w}$ = 4 dB
3	 65 EA + 40 Lv + WH 12,5 GK	$\Delta R_{i,w}$ = 9 dB
4	 10 LS 75 CW + WH 2 x 12,5 GK	Gleitender Deckenanschluss: $\Delta R_{i,w}$ = 10 dB Starrer Deckenanschluss: $\Delta R_{i,w}$ = 8 dB

GK	Gipsplatte
FS	Vorsatzschale mit Federschiene
WH	Faserdämmstoff zur Hohlraumbedämpfung, Anwendungstyp WH
L-v+WH	Lattung vertikal, auf dem Ständer montiert, e = 0,625 m + 40 mm Faserdämmstoff
EA+Lv+WH	Metallprofil mit elastischen Formteil zur akustischen Entkopplung, Lattung vertikal montiert, e = 0,5 m + 40 mm Faserdämmstoff
LS	Luftschicht
CW + WH	C-Wandprofil + 60 mm Faserdämmstoff

Schallschutz gegen Außenlärm – Ergebnisse eines Forschungsvorhabens

Dr. Andreas Meier
Müller-BBM Building Solutions GmbH
Planegg, Deutschland



Schallschutz gegen Außenlärm – Ergebnisse eines Forschungsvorhabens

1. Einleitung

Im Rahmen der letzten Novellierung der DIN 4109 vor sieben Jahren wurden die Anforderungen für den Schallschutz gegen Außenlärm um den Schutz in der Nacht für Schlafräume erweitert. Zuvor wurde lediglich der Schallschutz am Tag sichergestellt. In Kombination mit dem Entfall des sog. Schienenbonus als Abschlag bei der Berechnung des Beurteilungspegels von Schienenverkehr deckte die praktische Anwendung Schwachstellen auf. Hieraus ergab sich die Notwendigkeit, den aktuellen Stand zum Schallschutz gegen Außenlärm, insbesondere Anforderungen, Außenlärmbelastung, Nachweisführung und Schalldämmung von Außenbauteilen, vertieft zu überprüfen. In diesem Zuge wurde im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt), Berlin, ein Forschungsvorhaben durchgeführt, dessen Ergebnisse vorgestellt werden.

Zunächst wird die Entwicklung der Regelungen zum Schallschutz gegen Außenlärm in DIN 4109 dargestellt.

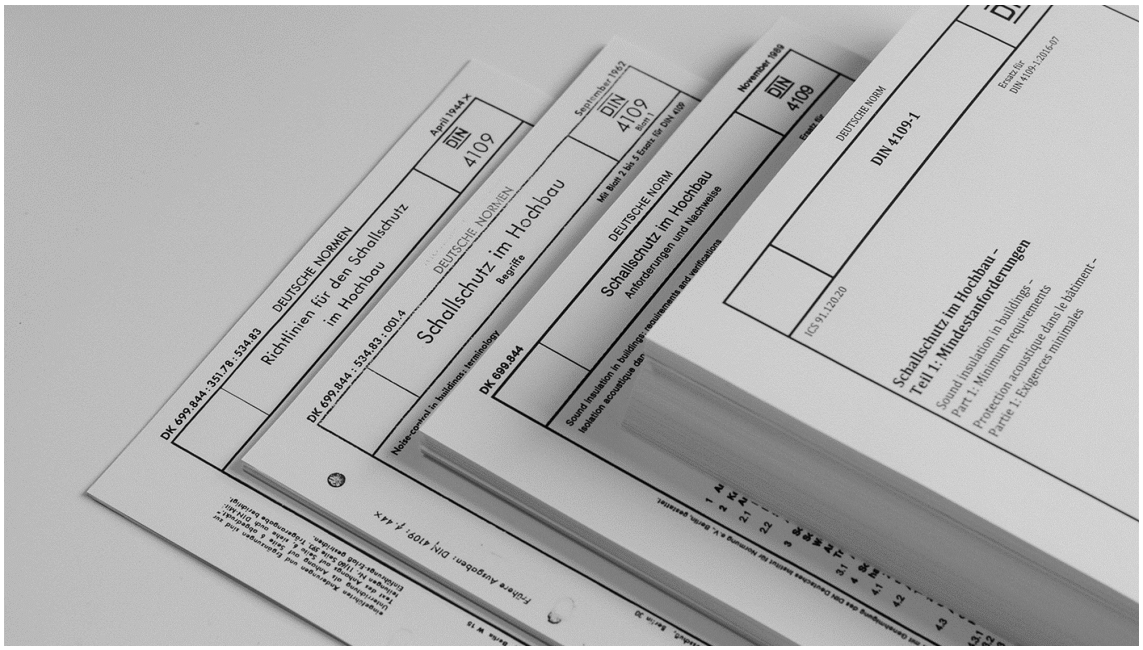


Abbildung 1: Aktuelle und historische Ausgaben der zentralen bauakustischen Norm, der DIN 4109 «Schallschutz im Hochbau». Enthalten sind Regelungen zum Schallschutz gegen Außenlärm.

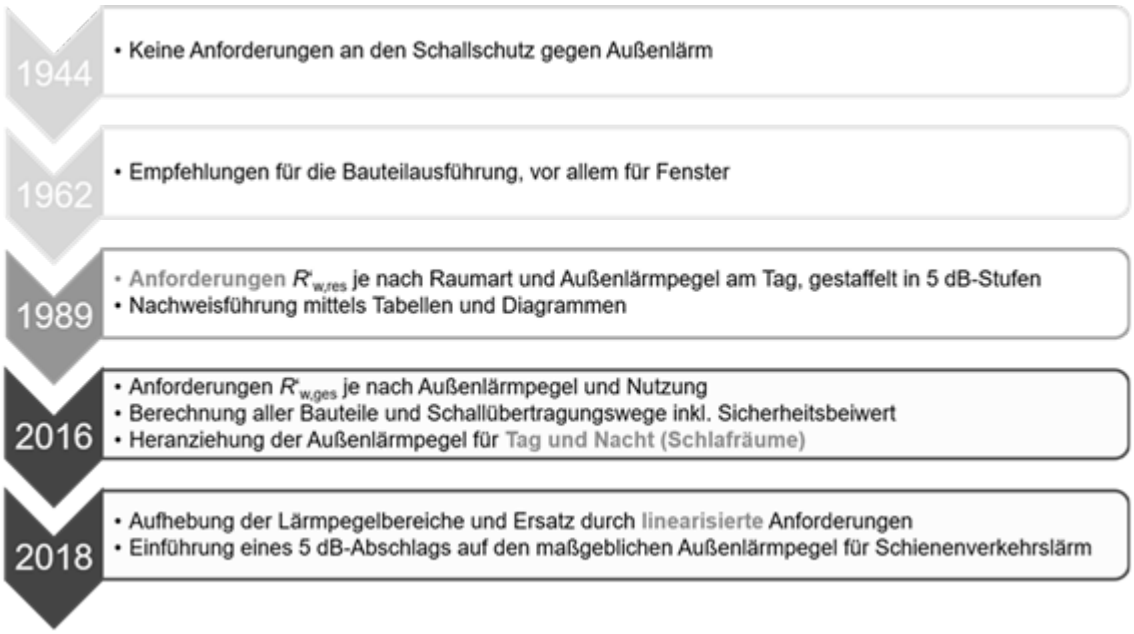


Abbildung 2: Entwicklung der Anforderungen zum Schallschutz gegen Außenlärm in DIN 4109.

2. DIN 4109:1989-11

In der 1989er-Fassung der DIN 4109 [2] – die 27 Jahre Bestand hatte – wurden die Anforderungen an den Schutz gegen Außenlärm dahingehend festgesetzt, dass in der Tabelle 8 (siehe Abbildung 3) ein resultierendes Schalldämm-Maß $R'_{w,res}$ für das gesamte Außenbauteil angegeben wurde. Die Anforderungen wurden ausschließlich auf Grundlage des Außenlärmpegels tags bestimmt, wobei die Anforderung in Lärmpegelbereiche gruppiert wurden.

Abbildung 3: Anforderungen an die Luftschalldämmung von Außenbauteilen;
Auszug aus der Fassung der DIN 4109 von 1989, dort Tabelle 8.

Spalte	1	2	3	4	5
Zeile	Lärmpegel-bereich	Maßgeblicher Außenlärm-pegel in dB(A) [1]	Raumarten		
			Bettenräume in Krankenanstalten und Sanatorien	Aufenthaltsräume in Wohnungen, Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten, Unterrichtsräume und Ähnliches	Büroräume [1] und Ähnliches
			erf. $R'_{w,res}$ des Außenbauteils in dB		
1	I	Bis 55	35	30	–
2	II	55 bis 60	35	30	30
3	III	61 bis 65	40	35	30
4	IV	66 bis 70	45	40	35
5	V	71 bis 75	50	45	40
6	VI	76 bis 80	[2]	50	45
7	VII	> 80	[2]	[2]	50

1) An Außenbauteile von Räumen, bei denen der eindringende Außenlärm aufgrund der in den Räumen ausgeübten Tätigkeiten nur einen untergeordneten Beitrag zum Innenraumpegel leistet, werden keine Anforderungen gestellt.
2) Die Anforderungen sind hier aufgrund der örtlichen Gegebenheiten festzulegen.

Es kann gezeigt werden, dass hinter dieser Anforderungstabelle ein mittlerer Innenpegel im Raum je nach Raumart steht. Im Fall von Wohnungen oder Unterrichtsräumen beträgt dieser 35 dB(A). Hieraus ergibt sich ein in den Tabellenwerten enthaltener Korrekturwert als Aufschlag auf die Anforderung an das bewertete Schalldämm-Maß von 5 dB, der vergleichbar mit den Korrekturwerten aus der VDI 2719 [3] für Außenlärmarten zu verstehen ist. Hierdurch soll ausgeglichen werden, dass ein bewertetes Schalldämm-Maß nicht der A-bewerteten Schallpegeldifferenz zwischen Außen und Innen entspricht.

Neben der Tabelle mit den Anforderungen wurde eine Tabelle mit Korrekturwerten (Tabelle 9, siehe Abbildung 4) eingeführt, mit der die Schalldämm-Maße aus Tabelle 8 in Abhängigkeit vom Verhältnis der gesamten Außenfläche eines Raumes zur Grundfläche des Raumes erhöht bzw. gemindert werden.

Abbildung 4: Korrekturwerte für das erforderliche resultierende Schalldämmmaß nach Tabelle 8 in Abhängigkeit vom Verhältnis $S_{(W+F)}/S_G$; Auszug aus der Fassung der DIN 4109 von 1989, dort Tabelle 9.

Spalte/Zeile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$S_{(W+F)}/S_G$	2,5	2,0	1,6	1,3	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4
2	Korrektur	+5	+4	+3	+2	+1	0	−1	−2	−3

1) $S_{(W+F)}$: Gesamtfläche des Außenbauteils eines Aufenthaltsraumes in m^2
2) S_G: Grundfläche eines Aufenthaltsraumes in m^2

Die Tabelle reagiert damit auf den Sachverhalt, dass bei Räumen mit großer Außenwandfläche, aber geringer Raumtiefe, die Schalldämmung der Außenbauteile höher ausfallen muss als bei einem tiefen Raum mit vergleichsweise kleiner Außenwandfläche, um einen gleichbleibenden Schallschutz – unabhängig von der Raumgeometrie und Größe des Außenbauteils – zu gewährleisten. Hieran wird deutlich, dass es den Autoren der DIN 4109 bei den Anforderungen an die Luftschalldämmung von Außenbauteilen – im Gegensatz zu den Anforderungen an die Luft- und Trittschalldämmung der anderen Bauteile (Wände, Decken, Türen etc.) – tatsächlich um einen gleichbleibenden Schallschutz – unabhängig von der Raumgeometrie und der Größe des Trennbauteils – ging.

In der Tabelle 10 (siehe Abbildung 5) konnten – unter Voraussetzung bestimmter räumlicher Randbedingungen – die erforderlichen Schalldämm-Maße separat für die Wände und Fenster in Abhängigkeit vom Fensterflächenanteil abgelesen werden.

Abbildung 5: Erforderliche Schalldämmmaße erf. $R'_{w,ges}$ von Kombinationen von Außenwänden und Fenstern, aus der Fassung der DIN 4109 von 1989, dort Tabelle 10.

Spalte	1	2	3	4	5	6	7
Zeile	erf. $R'_{w,res}$ in dB nach Tabelle 8	Schalldämmmaße für Wand/Fenster in … dB/ … dB bei folgenden Fensterflächenanteilen in %					
		10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %
1	30	30/25	30/25	35/25	35/25	50/25	30/30
2	35	35/30 40/25	35/30	35/32 40/30	40/30	40/32 50/30	45/32
3	40	40/32	40/35	45/35	45/35	40/37 60/35	40/37
4	45	45/37 50/35	45/40 50/37	50/40	50/40	50/42 60/40	60/42
5	50	55/40	55/42	55/45	55/45	60/45	–

Diese Tabelle gilt nur für Wohngebäude mit üblicher Raumhöhe von etwa 2,5 m und Raumtiefe von etwas 4,5 m oder mehr, unter Berücksichtigung der Anforderungen an das resultierende Schalldämmmaß erf. $R'_{w,res}$ des Außenbauteiles nach Tabelle 8 und der Korrektur von −2 dB nach Tabelle 9, Zeile 2.

3. DIN 4109:2016-07

Die Anforderungen der 1989er-Fassung der DIN 4109 hatten 27 Jahre bestand, bis im Juni 2016 die grundlegend überarbeitete DIN 4109 erschien. Die Tabelle für die Anforderungen an die Luftschalldämmung an Außenbauteile (vormals Tabelle 8, nun Tabelle 7) hat sich dabei gegenüber der Vorgängerfassung nicht grundlegend verändert.

Im Gegensatz zur Vorgängerfassung ergibt sich jedoch insofern ein wesentlicher Unterschied, als dass die 2016er-Fassung nun erstmals in der Geschichte der DIN 4109 die nächtliche Lärmbelastung für Schlafräume explizit berücksichtigt. Da eine separate Tabelle für die Anforderungen nachts keinen Konsens im Normungsausschuss fand, behalf man sich mit einem «Kunstgriff»: Sobald die Differenz zwischen dem Außenlärmpegel nachts und dem Außenlärmpegel tags < 10 dB beträgt, ist der Außenlärmpegel nachts für die Bestimmung der Anforderungen maßgeblich und wird pauschal mit +10 dB beaufschlagt. Mit diesem Wert wird dann die erforderliche Schalldämmung der Außenbauteile aus der Tabelle in Abbildung 3 abgelesen.

Die Berücksichtigung der nächtlichen Außenlärmbelastung hatte in vielen Fällen eine mitunter deutliche Erhöhung der Anforderungen an die Außenbauteile gegenüber der 1989er-Fassung zur Folge, insbesondere beim Schienenverkehrslärm, der rechnerisch oftmals tags wie nachts gleichartige Beurteilungspegel aufweist.

4. DIN 4109:2018-01

Im Januar 2018 erschien eine Neufassung der Teile DIN 4109-1 und DIN 4109-2 [1].

Nachdem über 15 Jahre an der neuen DIN 4109 gearbeitet wurde, war es für viele Anwender unverständlich, dass bereits sechs Monate nach Erscheinen der Norm Änderungen erforderlich sind, die im Wesentlichen den Schallschutz gegen Außenlärm betreffen.

Hierzu gab es einen maßgebenden Grund: Ende 2014 wurden die Berechnungsverfahren Schall 03 für Schienenverkehr überarbeitet und in der 16. BImSchV [4] implementiert. Eine wesentliche Änderung war, dass der Schienenbonus von 5 dB entfiel. Demzufolge lagen zum Entwurf der DIN 4109 aus dem Jahr 2013 in dieser Sache keine Einsprüche vor. Nachdem dann z. B. in Bebauungsplanverfahren im Jahr 2015 erste Anwendungen der Entwurfsfassung der DIN 4109 erfolgten, wurde recht schnell klar, dass die ursprünglich austarierten Verhältnisse zwischen den Regelwerken zur Berechnung des Außenlärms und den Anforderungen nach der Entwurfsfassung nicht mehr stimmten. Der Zug in Richtung Herausgabe der DIN 4109 sollte nicht mehr aufgehalten werden. Man beschloss, das Thema in einem separaten Arbeitskreis zu behandeln und erforderliche Änderungen nachzuführen, was mit der Ausgabe Januar 2018 erfolgte.

In der aktuellen Fassung der DIN 4109:2018-01 wurden gegenüber der 2016er-Ausgabe hinsichtlich des Außenlärms folgende wesentliche Änderungen vorgenommen:

- Entfall der Tabelle 7 im Anforderungsteil DIN 4109-1 und damit der stufenweisen Anforderungen in 5 dB-Schritten in Abhängigkeit von Lärmpegelbereichen zugunsten einer linearen Berechnung der Anforderungen
- Berücksichtigung eines spektral begründeten Abschlages bei Schienenlärm von pauschal 5 dB im Berechnungsteil zur Ermittlung des maßgeblichen Außenlärmpegels in DIN 4109-2.

Insbesondere der pauschale Abschlag von 5 dB beim Schienenlärm rief eine Welle der Entrüstung und Diskussionen hervor, da dieser Abschlag nicht hinreichend erläutert wurde. Das bei der DIN e.V. folgende Schlichtungs- und Schiedsverfahren führte zur Forderung nach Durchführung eines Forschungsvorhabens zum Schallschutz gegen Außenlärm, dessen Inhalte und Erkenntnisse später beschrieben werden.

Die aktuell gültige Norm enthält folgendes Vorgehen: Für die Umsetzung der linearisierten Anforderungen in DIN 4109-1:2018-01 wird ein Wert für die Schutzbedürftigkeit der Raumart vom ermittelten maßgeblichen Außenlärmpegel L_a abgezogen, um die Anforderung an das Gesamt-Schalldämm-Maß $R'_{w,ges}$ des Außenbauteils zu bestimmen:

$R'_{w,ges} = L_a - K_{Raumart}$

Mit $K_{Raumart}$ gleich 25 dB für Krankenhäuser und Sanatorien

30 dB für Wohngebäude, Übernachtungsräume in Hotels und Schulräume

35 dB für Büroräume

5. Korrektursummanden von Lärmarten

Zielsetzung für den Schallschutz gegen Außenlärm ist die Unterschreitung von maximal zulässigen Innenschalldruckpegeln bei Außenlärmbelastung. Diese Innenschalldruckpegel sind abhängig von der Raumart, also z. B. Schlafzimmer oder Büroraum. In DIN 4109 werden im Unterschied zur VDI 2719 diese Zielwerte nicht angegeben. Die schalltechnische Anforderung wird in Abhängigkeit der Außenlärmbelastung an das bewertete Schalldämm-Maß R'_w des Außenbauteils gestellt.

Korrektursummanden sind erforderlich, da das bewertete Schalldämm-Maß R'_w nicht der A-Schallpegeldifferenz zwischen Außen- und Innenpegel entspricht. Typischerweise sind Bauteile im unteren bauakustischen Frequenzbereich weniger schalldämmend als im oberen Frequenzbereich. Insofern werden Geräusche mit hohem tieffrequentem Pegelanteil weniger gut gedämmt. Cremer sowie Gösele sind in den 1960er-Jahren analog zur mittleren ungünstigen Abweichung der Bezugskurve nach DIN EN ISO 717-1 [4] zunächst von einem 2 dB-Abschlag auf das bewertete Schalldämm-Maß R'_w ausgegangen.

Im Fall des Außenlärms mit unterschiedlichen Schallspektren aufgrund unterschiedlicher Quellen, z. B. durch Verbrennungsmotoren, Reifen-Fahrbahn-Geräusche, Flugzeugturbinen oder Schiene-Rad-Quellen von Schienenfahrzeugen, gelingt die vereinfachte Arithmetik mit einem bewerteten Schalldämm-Maß zur Berechnung eines Innenpegels nur eingeschränkt. Im Prinzip werden Kategorien für Außenlärmarten mit unterschiedlichen Korrektursummanden angewendet, die jeweils vergleichbare Frequenzverteilungen aufweisen. Solche Korrektursummanden sind in der VDI-Richtlinie 2719 [2] oder der 24. BImSchV [3] z. B. in Abhängigkeit der vorliegenden Verkehrswege zu finden. Eine Kategorisierung bzw. eine Einbeziehung der Schalldämmspektren von Außenbauteilen erfolgte dabei nicht.

Bislang wurden vor allem die heranzuziehenden Korrektursummanden von Lärmarten kontrovers diskutiert. Diese werden in den Regelwerken üblicherweise transparent und klar angegeben. Im Fall der DIN 4109 war in der Tabelle 8 aus dem Jahr 1989 bzw. ist in der aktuellen Fassung ein pauschaler Wert für alle Lärmarten von 5 dB zur Vereinfachung ohne gesonderte Deklaration im Term $K_{Raumart}$ enthalten, wie die Sichtung von alten Aufzeichnungen zur Normung zeigte.

6. Durchführung des Forschungsvorhabens

In einem ersten Schritt wurden qualitätsgesicherte Außenlärmspektren gesammelt. Hieraus wurden unter Einbeziehung üblicher Schalldämmspektren von Außenbauteilen spektral in Terzen die resultierenden Innenpegel berechnet. Die Differenz zwischen der Berechnung auf Grundlage von Einzahlangaben (A-Pegel und bewertetes Schalldämm-Maß) und der spektralen Berechnung ergab dann die individuellen Korrektursummanden.

Nachfolgend sind die maßgebenden Ergebnisse gegliedert nach Außenlärmarten zusammengestellt.

7. Straßenverkehr

Die Auswertung der durchgeführten Messungen und Untersuchungen zeigt unter Berücksichtigung der angesetzten Schalldämmungsverläufe folgende Ergebnisse:

- Gleichmäßig fließender Straßenverkehr führt zu einem mittleren Korrektursummanden von 0,6 dB (σ = 1,4 dB). Bei höheren Geschwindigkeiten werden die niedrigsten Werte erreicht, da hier anscheinend die höherfrequenten aerodynamischen Strömungsgeräusche an der Karosserie und Reifen-Fahrbahngeräusche das Schallpegelspektrum dominieren.
- Unregelmäßig fließender Verkehr bzw. Verkehr mit Beschleunigungsvorgängen führt zu einem mittleren Korrektursummanden von 3,1 dB (σ = 1,6 dB). Bei Beschleunigungsvorgängen, insbesondere in Kombination mit niedrigen Geschwindigkeiten, d. h. geringen aerodynamischen Geräuschanteilen, steigt der Anteil von tieffrequenten Geräuschen, offensichtlich Motorgeräuschen, an.
- Straßendeckschicht: Ausnahme «Flüsterasphalt»

  Wesentliche Unterschiede der spektralen Verläufe wurden für Straßendeckschichten mit offenporigen Asphaltbelägen beobachtet. Die Wirkung von offenporigen Asphaltbelägen («Flüsterasphalt») ist bei hohen Frequenzen höher als bei tiefen Frequenzen. Hieraus ergibt sich eine Verlagerung des relativen Frequenzspektrums hin zu tiefen Frequenzen. Offenporige Asphaltbeläge können aus diesem Grund einen Einfluss auf den Korrektursummanden nehmen. Die entsprechenden Auswirkungen auf den Korrektursummanden können anhand der Oktavspektren nach CNOSSOS-EU aus dem Vergleich der Angaben mit offenporigem Asphalt mit den Angaben für Asphaltbeton ermittelt werden. In der Regel ergibt sich eine Erhöhung der Korrektursummanden, welche besonders deutlich bei Bauteilen mit tieffrequenten Schalldämmungseinbrüchen festzustellen ist.

  Sofern Störwirkungszuschläge in Berechnungsverfahren vorhanden sind, stellt dies bereits eine Bewertung der ermittelten Beurteilungspegel dar. Dies muss dann wiederum bei der Beurteilung mit Anforderungen berücksichtigt werden. Die Überprüfung des zentralen Regelwerkes für Straßenverkehrsgeräusch, der RLS-90 in der 16. BImSchV bzw. der neuen RLS-19, zeigt folgende Ergebnisse:

- Störwirkungszuschläge in RLS-90 und RLS-19

  In der RLS-90 sind neben den Verfahren zur Berechnung der auftretenden Schalldruckpegel auch Störwirkungszuschläge eingearbeitet. Exemplarisch kann hier der Zuschlag für die erhöhte Störwirkung von lichtzeichengeregelten Kreuzungen und Einmündungen nach RLS-90 bzw. die Knotenpunktkorrektur in der überarbeiteten RLS-19 genannt werden. Der in einem Bereich von 120 m abstandsabhängige Zuschlag in RLS-19 weist Werte von bis zu 2 dB an Kreisverkehren und bis zu 3 dB an lichtzeichengeregelten Knotenpunkten auf.

8. Schienenverkehr

Die Auswertung der durchgeführten Messungen und Untersuchungen zeigt folgende Ergebnisse:

- Personen- und Güterverkehr

  Die Korrektursummanden liegen im Mittel für Personen- und Güterverkehr auf der Grundlage der Schall 03-Auswertung bei 0,7 dB (σ = 0,8 dB). Die vorgelegten Messungen bestätigen im Wesentlichen diese Angabe. Eine Ausnahme bilden Straßenbahnen, siehe unten. Es wurden keine signifikanten Unterschiede der Korrektursummanden zwischen Personen- und Güterverkehr vorgefunden.

– «Flüsterbremse»

  Die schalltechnisch optimale Bremsentechnologie (Verbundstoffbremse, Scheibenbremse) bei Güterverkehr, welche keine erhöhte Rauheit der Räder von Schienenfahrzeugen verursacht, verringert die auftretenden Schalldruckpegel in erheblicher Weise. Diese Technologie hat aber keine erkennbare Auswirkung auf das relative Schallpegelspektrum, wie aus der Auswertung der Spektren in Schall 03 hervorgeht. Durch die schalltechnisch optimierte Bremsentechnologie werden daher keine geänderten Korrektursummanden festgestellt.

– Straßenbahnen

  Die Schallpegelspektren von Straßenbahnen in Berlin und München zeigen im Vergleich zu sonstigem Schienenverkehr einen erhöhten Pegelanteil im Bereich zwischen 100 Hz – 500 Hz auf, was zu höheren Korrektursummanden führt. Das ist vermutlich mit den allgemein langsameren Fahrgeschwindigkeiten bzw. erhöhtem bzw. unrundem Radverschleiß durch enge Kurvenradien und der damit verbundenen Schallabstrahlung zu erklären. Die Korrektursummanden betragen im Mittelwert 4,8 dB (σ = 2,4 dB). Zu beachten ist, dass diese Messungen in der Regel in bebauten Umgebungen stattfanden, für die im Allgemeinen eine Anhebung der Pegel im Frequenzbereich unter ca. 1000 Hz festgestellt wurde.

– Störwirkungszuschläge in Schall 03

  Das in der Schall 03 beschriebene Verfahren zur Berechnung der Beurteilungspegel von Schienenverkehr enthält ebenfalls Störwirkungszuschläge. Exemplarisch kann hier der Zuschlag für die erhöhte Störwirkung beim Befahren von Brücken oder für Auffälligkeit von Geräuschen (z. B. Kurvenfahrgeräusch, Gleisbremsgeräusch) nach Tabelle 8 in Schall 03 genannt werden. Für Brücken werden nach Schall 03 Zuschläge zur Ermittlung des Beurteilungspegels zwischen 3 bis zu 12 dB vergeben. Lärmsanierte Brücken werden wiederum mit verminderten Zuschlägen goutiert.

  Das heißt, in der Berechnungsvorschrift Schall 03 zu Brücken sind neben dem physikalisch erforderlichen Zuschlag auf den Schalldruckpegel noch Störwirkungszuschläge unbekannter Höhe vorhanden.

9. Luftverkehr

In der Ausarbeitung wurden keine neuen Auswertungen zu Korrektursummanden von Luftverkehr vorgenommen. In den Abschlußarbeiten von Leupoldt werden Korrektursummanden in der Größenordnung von ca. 4 bis 8 dB genannt. In der Abschlussarbeit von Fischer ist ein Wert von 7 dB (Einfachfenster) bzw. 8 dB (Kastenfenster) ermittelt worden.

10. Mittlere Außenlärmspektren

Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens wurden mittlere Außenlärmspektren für Außenlärmarten gebildet. Diese wurden mit einschlägigen Referenzspektren aus den einschlägigen Regelwerken verglichen.

Nachfolgend sind diese mittleren Außenlärmspektren für die Verkehrslärmarten Straße/ Schiene und deren Standardabweichung angegeben. In den Diagrammen sind zusätzlich die standardisierten Lärmspektren Nr. 1 «C» und Nr. 2 «C_{tr}» aus DIN EN ISO 717-1 [4] eingetragen.

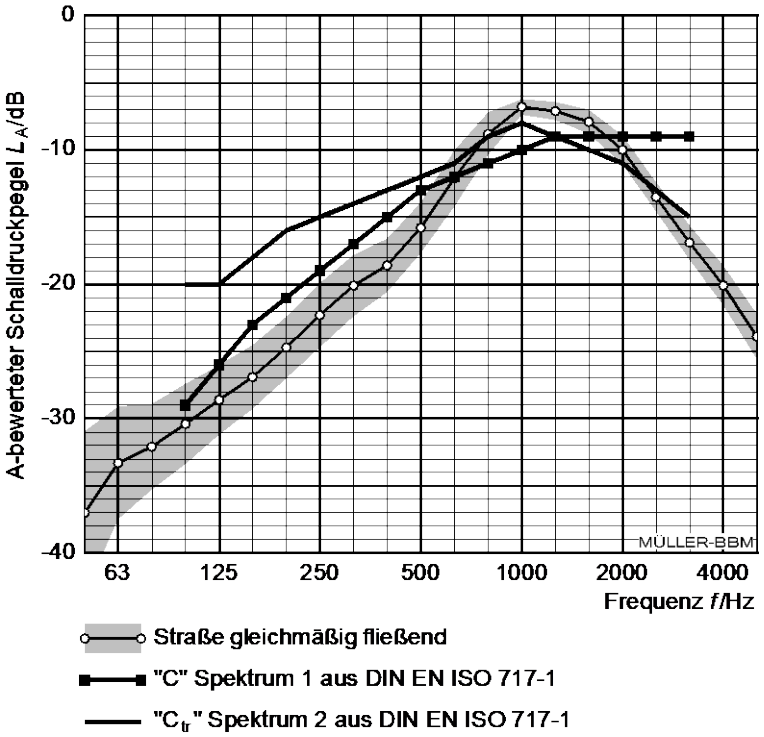


Abbildung 6: Relatives Pegelspektrum für gleichmäßig fließenden Straßenverkehr.

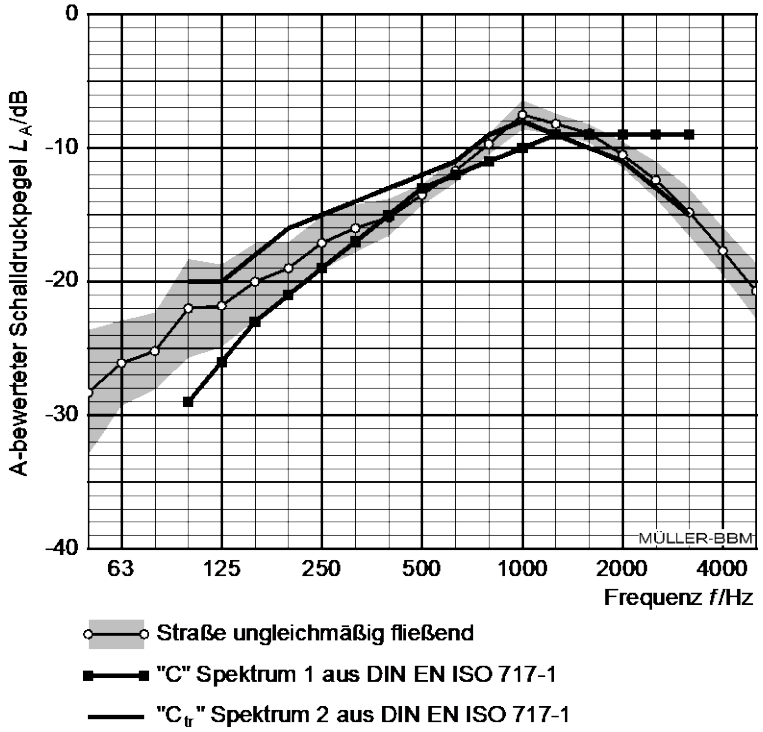


Abbildung 7: Relatives Pegelspektrum für ungleichmäßig fließenden Straßenverkehr.

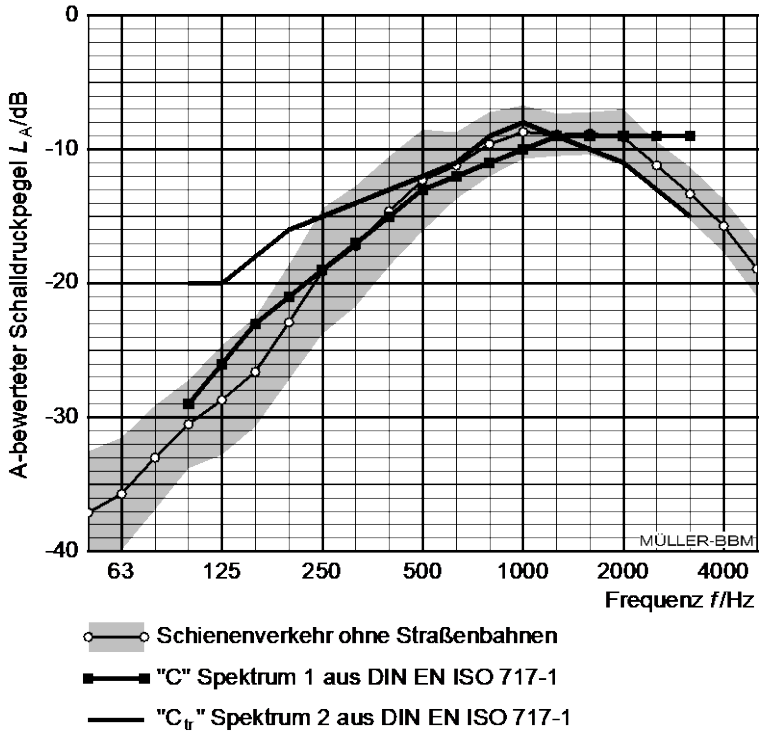


Abbildung 8: Relatives Pegelspektrum für Schienenverkehr (ohne Straßenbahnen).

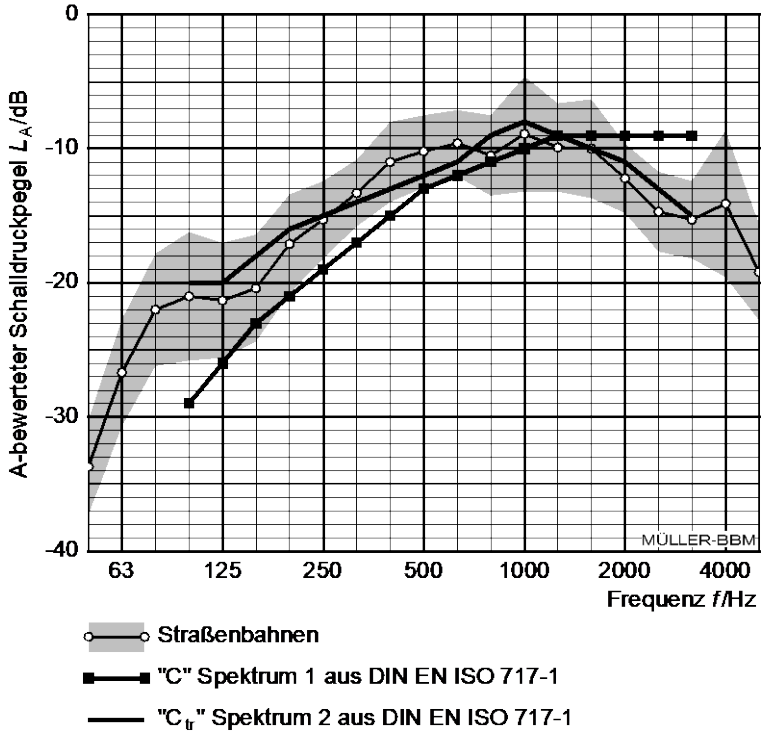


Abbildung 9: Relatives Pegelspektrum für Straßenbahnen.

Der Vergleich der relativen Außenlärmspektren mit den Referenzspektren lässt folgende Zuordnung für geeignet erscheinen:

Abbildung 10: Zuordnung der Referenzspektren zu den Außenlärmarten

Außenlärmart	**Referenzspektrum gemäß DIN EN ISO 717-1**
Straßenverkehr gleichmäßig fließend	*C*-Spektrum Nr. 1
Straßenverkehr ungleichmäßig fließend	C_{tr}-Spektrum Nr. 2
Schienenverkehr (ohne Straßenbahnen)	*C*-Spektrum Nr. 1
Straßenbahnen	C_{tr}-Spektrum Nr. 2

11. Schlussfolgerung aus dem Forschungsvorhaben

Die Detailauswertung und Gruppierung der Außenlärmspektren im Nachgang zu einem Expertenworkshop im 2. Halbjahr 2020 zeigte, dass es gelingt, die vorgefundenen Außenlärmspektren den Referenzspektren der Spektrum-Anpassungswerte *C* und C_{tr} zuzuordnen. Auf dieser Grundlage wurde ein Normvorschlag entwickelt.

Statt einer Anforderung $R'_{w,ges}$ unter Einbeziehung von festen Korrektursummanden für den maßgeblichen Außenlärmpegel wird die Anforderung je nach Zuordnung der Außenlärmart stattdessen für die Größe $R'_{w,ges}$ + C bzw. $R'_{w,ges}$ + C_{tr} ermittelt. Das Außenbauteil legt durch seine normgemäße Kennzeichnung der schalldämmenden Eigenschaften den Korrekturwert gegenüber Außenlärm selbst fest. Für die Außenlärmarten wird lediglich zwischen zwei Kategorien unterschieden.

Die Kennzeichnung der Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} ist seit der 1997er-Ausgabe der DIN EN ISO 717-1 [4] bereits seit 25 Jahren bei Prüfstands- und Baumessungen obligatorisch, weshalb von einer sehr guten Verfügbarkeit der zugehörigen Werte ausgegangen wird.

12. Aktuell diskutierter Normungsvorschlag

Die beabsichtigten wesentlichen Änderungen gegenüber der aktuell gültigen Version DIN 4109:2018-1 können wie folgt stichpunktartig zusammengefasst werden:

- Anforderung an das Außenbauteil unter Einbeziehung des Spektrumanpassungswertes *C* bzw. C_{tr}
- Im Gegenzug wird vom maßgeblichen Außenlärmpegel ein um 5 dB geringerer Wert abgezogen, um die Anforderung zu erhalten, z. B. bei Wohnungen 35 dB statt ursprünglich 30 dB.
- Streichung des (umstrittenen) 5 dB-Abschlags für Schienenverkehr in DIN 4109-2.
- Eindeutige Benennung der Anforderung im Nachtzeitraum im Anforderungsteil der DIN 4109-1. Bislang wird der Nachtzeitraum indirekt durch einen 10 dB-Zuschlag auf den maßgeblichen Außenlärmpegel abgebildet.
- Streichung der Anwendbarkeit von Lärmpegelbereich, da diese einerseits durch zwischenzeitig zurückgezogene Berechnungsvorschriften ermittelt wurden und andererseits die Schutzbedürftigkeit im Nachtzeitraum nicht berücksichtigen.
- Einbeziehung der aktuell gültigen Berechnungsvorschriften für Straßen- und Schienenverkehrslärm.

Folgende Regelung wird derzeit in DIN 4109-1 angestrebt. Dieser Regelung wird noch diskutiert und ist ausdrücklich als vorläufig zu betrachten:

Die Anforderung an das bewertete Bau-Schalldämm-Maß mit dem entsprechenden Spektrum-Anpassungswert erf. (R'_w + *C*) bzw. erf. (R'_w + C_{tr}) des gesamten Außenbauteils von schutzbedürftigen Räumen ergibt sich in Abhängigkeit des maßgeblichen Außenlärmpegels, der Raumnutzung und der Art des Außenlärms.

Abbildung 11: Geplante Anforderungstabelle für den Schallschutz gegen Außenlärm in E DIN 4109-1.

Spalte	1	2	3
Zeile			
	Raumart	erf.(R'_w+C)[a] bzw. erf.(R'_w+C_{tr})[b]	
			mindestens einzuhalten
1	Bettenräume in Krankenhäusern	$L_{a,T}$ – 30 dB	30 dB
2	Aufenthaltsräume in Wohnungen, Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten, Unterrichtsräume und Ähnliches	$L_{a,T}$ – 35 dB	25 dB
3	Büroräume und Ähnliches	$L_{a,T}$ – 40 dB	
4	Räume mit Schlafnutzung	$L_{a,N}$ – 25 dB	
	[a] gilt bei Außenlärm durch - Straßenverkehr außerhalb geschlossener Ortschaften, Autobahnverkehr, Verkehr auf Bundes-, Landes- oder Kreisstraßen; - Vorfahrtsstraßen innerhalb geschlossener Ortschaften ohne Knotenpunktkorrektur nach RLS 19, - Schienenverkehr ohne Straßenbahnen nach § 4 PbefG. [b] gilt bei Außenlärm durch - Straßenverkehr auf allen anderen Straßen innerhalb geschlossener Ortschaften oder Straßen mit offenporigem Asphalt nach Tab. 4a aus RLS 19, - Straßenbahnen gemäß § 4 PbefG, - Flugverkehr, Wasserverkehr, Gewerbe - oder bei Abschirmeinrichtungen und abschirmenden Bauwerken, z. B. Lärmschutzwände und –wälle, Gebäude etc., im Schallausbreitungsweg.		

Dabei ist

maßgeblicher Außenlärmpegel gemäß DIN 4109-2, 5.4.5

$L_{a,T}$	für den Tagzeitraum
$L_{a,N}$	für den Nachtzeitraum
C	Spektrum-Anpassungswert gemäß Spektrum Nr. 1 nach DIN EN ISO 717-1
C_{tr}	Spektrum-Anpassungswert gemäß Spektrum Nr. 2 nach DIN EN ISO 717-1
erf. (R'_w + C)	Anforderung an das bewertete Bau-Schalldämm-Maß des Außenbauteils unter Einbeziehung des Spektrum-Anpassungswertes C nach DIN EN ISO 717-1
erf. (R'_w+ C_{tr})	Anforderung an das bewertete Bau-Schalldämm-Maß des Außenbauteils unter Einbeziehung des Spektrum-Anpassungswertes C_{tr} nach DIN EN ISO 717-1

Räume mit Schlafnutzung sind im Sinne der beabsichtigten Regelungen Schlaf- und Kinderzimmer in Wohngebäuden, Übernachtungsräume in Hotels und Beherbergungsstätten sowie Bettenräume in Krankenhäusern.

Bei Überlagerung unterschiedlicher Lärmarten oder bei unterschiedlich orientierten Außenflächen eines Raumes erfolgt die Zuordnung der Anforderung an das Außenbauteil durch die Lärmart mit dem höchsten Beurteilungspegel.

In DIN 4109-2 wird bei der Ermittlung des maßgeblichen Außenlärmpegels der Nachtzuschlag von 10 dB für Räume mit Schlafnutzung und der pauschale 5 dB-Abschlag für Schienenverkehr abgeschafft. Des Weiteren werden die Berechnungsgleichungen so angepasst, dass stattdessen die Größen R_w + C bzw. R_w + C_{tr} anwendbar sind.

13. Vergleich alte und neue Regelung

Anhand von Praxisbeispielen können folgende prinzipielle Auswirkungen im Vergleich zur bestehenden Regelung festgestellt werden:

- Für gleichmäßig fließenden Straßenverkehr tritt eine moderate Reduzierung der Anforderungen an die Außenbauteile auf. Der bislang enthaltene pauschale Korrekturwert von 5 dB wird durch die Einbeziehung von *C* ersetzt, der häufig –1 dB bis –2 dB beträgt. Die Reduzierung der Anforderung beträgt somit ca. 3 dB bis 4 dB.
- Für ungleichmäßig fließenden Straßenverkehr innerorts, Straßenverkehr mit geräuschmindernden Straßendeckschichten und Schienenverkehr ohne Lärmschutzeinrichtungen erfolgt im Wesentlichen keine Änderung der Anforderungen bzw. Bauteilkonstruktionen.
- Für Außenlärmsituationen mit dominierenden Straßenbahnen und Schienenverkehr mit Lärmschutzeinrichtungen, wie z. B. Lärmschutzwänden, tritt eine Erhöhung der Anforderungen an die Außenbauteile, d. h. in der Regel die Fenster, auf. Praxisbeispiele zeigen Erhöhung der Anforderungen der Fenster von 3 dB.

14. Quellenverzeichnis

[1] DIN 4109: Schallschutz im Hochbau
Teil 1: Mindestanforderungen. 2018 01
Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen. 2018-01
Teil 31 - 36: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes. 2016-07
Teil 4: Bauakustische Prüfungen. 2016-07
Teil 5: Erhöhte Anforderungen. 2020-08

[2] VDI 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen, 1987-08

[3] 24. BImSchV: 24. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung), 1997-02

[4] DIN EN ISO 717-1: Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Luftschalldämmung. 2013-06

[5] Möhler, U.: Stellungnahme zur Berücksichtigung des Maximalpegels von Schienenverkehrslärm in der DIN 4109, Schallschutz im Hochbau. 2019-12-02

[6] Meier, A.; Forschungsvorhaben Schallschutz gegen Außenlärm – Anforderungen zum baulichen Schallschutz gegen Außenlärm nach DIN 4109 unter Berücksichtigung des derzeitigen Stands der Technik als Grundlage für bauaufsichtliche Regelungen, 2021, ISBN 978-3-7388-0623-6, online verfügbar, siehe www.baufachinformation.de

AKUSTIK

Schallschutz im Holzbau – neue Aspekte

Massivholzdecken mit verbesserter Trittschalldämmung – funktionale Formgebung mit akustischen schwarzen Löchern

Dr. Stefan Schoenwald
Abt. Akustik/Lärmminderung, Empa
Dübendorf, Schweiz



Massivholzdecken mit verbesserter Trittschalldämmung – funktionale Formgebung mit akustischen schwarzen Löchern

1. Einleitung

Leistungsfähige Massivholzbauteile, wie zum Beispiel aus Brettsperrholz oder Brettschichtholz, haben dazu beigetragen, dass Holz weltweit vermehrt für lasttragende Bauteile in mehrgeschossigen Gebäuden eingesetzt wird. Diese Entwicklung wurde vor allem durch deren vergleichsweise hohe Biegesteifigkeit bei einem geringen Gewicht und durch deren ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile, wie zum Beispiel die Kohlenstoffspeicherung durch Holz und der hohe Vorfertigungsgrad, begünstigt. Schalltechnisch ist die Leistungsfähigkeit von Massivholzbauteilen jedoch gerade wegen dieser mechanischen Eigenschaften eingeschränkt. Dies betrifft insbesondere den Trittschall bei tiefen Frequenzen, der durch gehende Menschen oder springenden Kindern verursacht wird und eine der Hauptursachen für Störungen in Gebäuden [1] darstellt. Dies ist besonders ein Problem in Ländern, wie im D-A-CH-Raum, mit hohen baurechtlichen Schallschutzanforderungen und einem hohen Anspruch an Komfort und Qualität, in denen bei der Planung von Neubauten oft zusätzlich strengere Grenzwerte für den tieffrequenten Trittschall auf privatrechtlicher Basis vereinbart werden. In der Schweiz gibt es hierzu eine Empfehlung der Lignum [2].

2. Stand der Technik

Anforderungen für den Trittschall bei tiefen Frequenzen sind aber alleine mit schweren, schwimmenden Fussbodensystemen, welche auch für Fussbodenheizungen erforderlich sind, aufgrund deren Masse-Feder-Resonanz in der Regel nicht erreichbar. Daher werden in der Schweiz häufig Holzbetonverbund-Decken eingesetzt oder wie in anderen Ländern Massivholzdecken mit einer zusätzlichen Splittschüttung beschwert [3]. Hierbei werden häufig Splittschüttungen mit bis zu 12 cm Schichtdicke verwendet [4]. Dies ergibt eine zusätzliche Last von bis zu 200 kg/m^2, wodurch sich das Flächengewicht bezogen auf die Rohdecke bis zu verdreifacht. Bei hohen Holzgebäuden summieren sich pro Stockwerk die zusätzlich erforderliche Aufbauhöhe und das zusätzliche Flächengewicht, welches wiederum auf dem darunterliegenden Tragwerk lastet, zu enormen Grössen auf. Zum Beispiel beträgt für ein zehnstöckiges Gebäude die Gesamtdicke der Kiesschichten aller Stockwerke bis zu 1.2 m. Bei einer bescheidenen Stockwerksfläche von 500 m^2 – dies entspricht noch nicht einmal der Fläche eines Tennisplatzes – beträgt das zusätzliche Gesamtgewicht der Kiesschüttung aller Stockwerke bereits bis zu 1000t.

3. Lösungsansatz mit funktionaler Formgebung

In einem kürzlich erfolgreich abgeschlossenen Forschungsprojekt, welches von der Umwelttechnologie Förderung des schweizerischen Bundesamtes für Umwelt (BAFU) mitfinanziert wurde, wurden alternative effizientere Massnahmen zur Verbesserung des Trittschallschutzes von Massivholzdecken untersucht. Ziel war trotz einer signifikanten Reduktion des Materialeinsatzes und der zusätzlich aufgebrachten Masse der üblichen Splittschüttungen eine gleiche oder bessere Trittschalldämmung zu erzielen. Lösungsansatz war die Optimierung der Wechselwirkung zwischen den Schwingungen der Decke und der Splittschüttung durch eine funktionale Formgebung der Massivholzdecke. Hierzu wurde die Anwendung von Splitt gefüllten sogenannten «akustischen schwarzen Löchern» untersucht, wodurch die Splittschüttung eine effizientere Bedämpfung der Deckenschwingungen bewirkt und eine Reduktion der aufgebrachten Masse möglich ist.

Es wurde ein Deckenprototyp gefertigt, der in einem abschliessenden Laborversuch gemäss EN ISO 10140-3 den Nachweis erbringen musste, dass die Anforderungen und Empfehlungen an den tieffrequenten Trittschallschutz mit dem Deckensystem erreicht werden. Andere Leistungsmerkmale und Aspekte, wie zum Beispiel Statik, Brandschutz und Fertigung, wurden bei der Entwicklung erwogen, aber nicht primär bearbeitet. Die Ergebnisse der Studie wurden bereits in gleicher Form in weiteren Veröffentlichungen vorgestellt [5, 6].

3.1. Akustische schwarze Löcher (ASL)

Die Theorie der Akustischen Schwarzen Löcher (ASL) wurde erstmals in den späten 1980er Jahren für den eindimensionalen Fall eines Stabs mit einem sich geometrisch verjüngenden Ende veröffentlicht [7]. Seitdem wurden verschiedene Designs von ASLs vorgeschlagen und untersucht [8]. Das allgemeine Prinzip ist für alle Strukturen und Anwendungen gleich.

Durch eine Verringerung der Dicke und somit der Biegesteifigkeit einer Platte oder eines Stabes verlangsamt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von einfallenden Biegewellen. Dieser Effekt ist in Abbildung 1 für ein ideales Querschnittsprofil, dessen Geometrie einer Potenzfunktion entspricht und dessen Dicke stetig gegen Null strebt, dargestellt. Theoretisch geht in diesem Fall die Biegewellengeschwindigkeit gegen Null. Das heisst, die Welle wird nicht reflektiert und somit «verschluckt». Dieser Effekt tritt breitbandig oberhalb einer Grenzfrequenz auf. Er ist daher gut geeignet, um Breitbandschwingungen, wie z. B. bei Trittschallanregung, zu reduzieren.

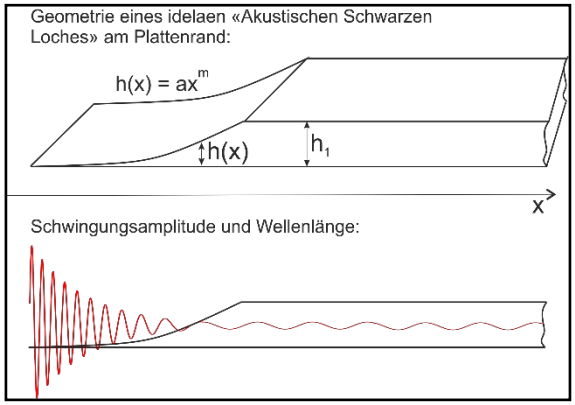


Abbildung 1: Darstellung eines idealen eindimensionalen ASL am Plattenrand

In der Praxis sind diese optimalen Querschnittsprofile nicht herstellbar oder gar anwendungstauglich. Im ASL nimmt auch die Schwingungsamplitude der Welle stetig zu und somit hier der Struktur durch Dämpfung gut Schwingungsenergie entzogen werden. Daher sind ASL mit einem Querschnittprofil mit einer endlichen Restdicke, wenn auch begrenzt, durch die Materialdämpfung wirksam. Dies ist in Abbildung 2 dargestellt. Der ASL-Effekt kann in diesem Fall durch zusätzliche Dämpfung des ASL weiter verstärkt werden [9].

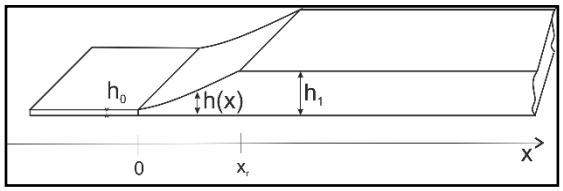


Abbildung 2: Darstellung eines eindimensionalen ASL mit endlicher Dicke am Plattenrand in der Praxis

Die Eintrittsfrequenz des Effekts ist abhängig von der ASL-Geometrie, während die Schwingungsreduzierung zusätzlich durch die Dämpfung bestimmt wird. Die relevantesten Entwicklungen für Plattenstrukturen sind die zweidimensionalen ASL (siehe Abbildung 3), das heisst kreisrunde Vertiefungen, welche auf einem plattenförmigen Bauteil angeordnet sind.

Die Herausforderung beim Entwurf von ASL ist die Ermittlung eines Querschnittprofils, welches für den gewünschten Frequenzbereich und Dämpfungswirkung geeignet ist.

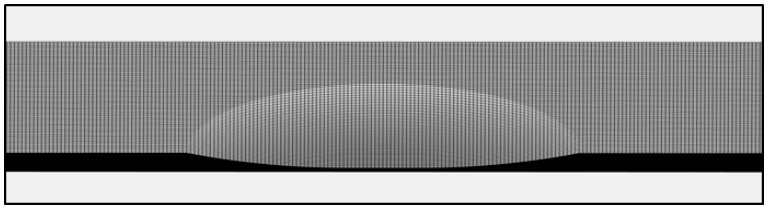


Abbildung 3: Darstellung des Querschnittes durch ein rundes zweidimensionales ASL angeordnet auf einer Platte

Das Querschnittsprofil h(x) des ASL in Abbildung 2 folgt in der Regel dem Potenzgesetz nach Gleichung 1, welches durch die ASL-Profilparameter, dem Koeffizient *a* und dem Exponent *m*, beschrieben wird.

$$h(x) = h_0 + ax^m \tag{1}$$

$$r = \left(\frac{h_1 - h_0}{a}\right)^{1/m} \tag{2}$$

Die Grösse *r* des ASL, das heisst die Länge des eindimensionalen ASL oder der Radius des zweidimensionalen ASL, sind durch die Plattendicke h_1 sowie der minimalen Restdicke h_0 gegeben. Bei zweidimensionalen ASL muss auch deren Position auf der Platte berücksichtigt werden.

Bei homogenen Materialien, wie Stahl oder Aluminium, ist der Steifigkeitsgradient im ASL nur eine Funktion der Materialdicke, die entweder analytisch oder numerisch effizient mit gängiger Finite-Elemente-Methode-Software (FEM) berechnet werden kann.
Die Anwendung von ASL wurde in vielen Industriesektoren bereits erforscht. Die Herstellung von ASL in dünnen Platten, die in vielen Leichtbaustrukturen des Automobil- und Luftfahrtbereichs sehr verbreitet sind, stellt jedoch eine Herausforderung dar [8]. Bislang ist die die Schwingungsdämpfung von Turbinenschaufeln einzige bekannte industrielle Anwendung von ASL [10].

3.2. Auslegung von akustischen schwarzen Löchern bei Brettsperrholzdecken

Holzwerkstoffböden, wie zum Beispiel Brettsperrholz (BSP), bestehen aus mehreren Schichten von Holzbalken oder Lamellen, die zu einem Verbundwerkstoff verleimt werden. Die Fasern aneinandergrenzender Schichten sind in der Regel rechtwinklig zueinander ausgerichtet. Die allgemeinen mechanischen Eigenschaften einer BSP-Platte hängen entscheidend von den Materialeigenschaften des Holzes sowie von der Anzahl, der Dicke und der Ausrichtung der Schichten ab. Weichholzarten wie Kiefer oder Fichte, die üblicherweise für BSP verwendet werden, sind stark orthotrop, das heisst deren Steifigkeit ist in der Richtung parallel zu den Fasern um eine Grössenordnung höher als in der normalen oder tangentialen Richtung.

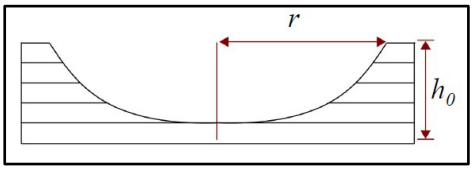


Abbildung 4: Darstellung des Querschnittes durch ein ASL auf einer BSP-Decke

Im Bereich der ASL werden stetig Lagen von dem BSP entfernt. Die lokalen strukturellen Eigenschaften in diesem Bereich hängen von der Anzahl der verbleibenden Lagen, ihrer Ausrichtung und ihrer verbleibenden Restdicke ab. Um all diese Faktoren bei der Dimensionierung eines ASL zu berücksichtigen, wurden numerische FEM-Berechnungen durchgeführt. Ziel war es, ASL-Geometrien zu finden, die geeignet sind, den von einem BSP-Boden abgestrahlten Trittschall zu reduzieren.

Für eine ausreichende geometrische Auflösung der ASL erfordern der schichtweise Aufbau des BSP bereits bei tiefen Frequenzen ein sehr feines FEM-Netz. Dies hat zur Folge, dass einfache FEM-Modelle mit üblichen Volumenelementen, bei denen die einzelnen Schichten und deren Geometrie explizit abgebildet werden, sehr gross und rechenintensiv sind.

Im ersten Schritt bei der Ermittlung von geeigneten ASL Parametern wurde daher ein recheneffizientes FEM-Model für BSP, mit dem die Trittschallübertragung im gesamten relevanten Frequenzbereich von 50 Hz bis 3.15 kHz in Minutenschnelle berechnet werden kann, entwickelt. Die eigentliche harmonische Analyse wird in der FEM-Software «ANSYS» durchgeführt. In der Berechnung wird das geschichtete BSP als eine einzelne äquivalente Schicht mit recheneffizienten Volumenschalenelementen abgebildet. Die dazu notwendigen äquivalenten Materialkonstanten werden jedoch im Voraus mit einem Homogenisierungsverfahren [11] ermittelt. Der Trittschallpegel wird in einem separaten Nachbearbeitungsschritt aus den Ergebnissen der FEM-Analyse berechnet. Dazu wird die von dem BSP-Element in ein Freifeld abgestrahlte Schallleistung aus der Oberflächenschnelle-Verteilung mittels diskreter Berechnungsmethode (DCM) oder Integral-Transformationsmethode (ITM) berechnet [12, 13].

Zur Erhöhung der Verluste der ASL sind alle gängigen Schwingungsdämpfungsbeläge, zum Beispiel viskös elastische Materialien, denkbar. In diesem Projekt wurde jedoch eine Befüllung der ASL mit Sand oder Splitt vorgesehen, da diese Materialien zum einen auch als Dämpfer wirken und bisher bereits üblicherweise als zusätzliche Masse aufgebracht werden.

3.3. Resultate

Im Folgenden sind die Ergebnisse von zwei Laborversuchen des Forschungsprojekts kurz dargestellt. Die Versuche an dem kleinen BSP Prototypen dienten in erster Linie der Validierung der Rechenmodelle mit denen dann die ASL für die grosse BSP Decke der zweiten Versuchsreihe ausgelegt wurden. In dieser zweiten Versuchsreihe wurden dann Trittschallmessungen gemäss der Norm EN ISO 10140-3 zum Nachweis der Leistungsfähigkeit der BSP-Decke mit ASL durchgeführt [14].

3.3.1. Validierung der FEM-Berechnung am kleinen BSP Prototyp

Die Versuche wurden zwei nominell identischen BSP-Platten (5-Schicht, Schichtdicke 20 mm) mit den Abmessungen 2.80 m (L) x 1.20 m (B) x 0.10 m (H) durchgeführt. Eine der Platten war eine Referenz, in die zweite wurden zwei ASL (1.00 m Durchmesser, max. Tiefe 80 mm) mit einer CNC-Fräse gefräst. Die geometrischen Parameter der ASL wurden mit FEM-Berechnungen mit dem beschriebenen Verfahren ermittelt. Die ASL-Geometrie wurde nicht umfassend optimiert, da mit dieser Versuchsreihe das FEM-Modell validiert wurde.

Für die Schwingungsmessungen wurden beide BSP-Platten nacheinander im Leichtbaulabor der Empa auf drei Airbags plaziert. Mit den Airbags wurden im Versuch freie Randbedingungen, die im FEM-Modell angewandt wurden, angenähert. Die Platten wurden jeweils an drei Anregungspunkten auf der Unterseite durch einen elektrodynamischen Trägheitsschwinger, Typ Data Physics IV40, mit einem Gleitsinussignal angeregt. Ein Foto des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 5 zu sehen. Zwei Anregepunkte befanden sich an zwei Ecken entlang einer der kurzen Kanten der Platten, und der dritte lag ungefähr in der Mitte der gegenüberliegenden Plattenkante. Am Anregungspunkt wurden die Kraft- und Beschleunigungssignale als Referenzsignale mit einem Impedanzkopf PCB 288D01 gemessen, der zwischen dem Schwingerreger und dem Prüfling angebracht war. Die Schwingungsantwort der Platte wurde auf der Oberseite mit einem Polytec Scanning Laser Vibrometer PSV 400 gemessen. Das rechteckige Messraster hatte 189 Messpunkten angeordnet in 9 Reihen und 21 Spalten. Aus der gemessenen Schwingung und der Kraft wurden die Transferadmittanzen an allen Messpunkten zum Vergleich mit den FEM-Ergebnissen bestimmt. Damit es möglich war auch bei der Platte mit ASL die gesamte Oberfläche abzutasten, um die die Auswirkungen der ABHs auf die Modenformen zu sehen, befanden sich die ASL bei der Messung auf der Plattenunterseite.

Die Ergebnisse der Schwingungsmessungen (blau) stimmen sehr gut mit den Plattenschwingungen aus der FEM-Berechnung (rot) in Abbildung 7 überein. Es sind die über alle Messpunkte gemittelten Transferadmittanzen für den Anregepunkt in der Mitte der Kante für die Referenzplatte (oben) und die Platte mit ASL (unten) dargestellt. Die gute Übereinstimmung ist repräsentativ für alle Messpunkte. Durch die ASL wird die Platte biegeweicher, so dass sich alle Moden zu tiefen Frequenzen verschieben. Die erste Mode der Platte ohne ASL lag bei ca. 35 Hz. In diesem Frequenzbereich haben die Airbags eine Resonanz, so dass die Resonanzspitze der Messergebnisse stärker als in der FEM-Berechnung gedämpft ist. Oberhalb von ca. 630 Hz ist die Modendichte so gross, dass nebeneinanderliegende Resonanzspitzen nicht klar unterschieden werden können. Der mittlere Verlauf der Transferadmittanzen stimmt jedoch zwischen Versuch und Berechnung sehr gut überein. Die Unterschiede bei sehr hohen Frequenzen sind bedingt durch Dickenschwingungen, welche messtechnisch nicht adäquat erfasst werden können.

In der Simulation wurden Materialeingangsdaten für die BSP-Platten verwendet, welche für die grossen BSP-Elemente ermittelt wurden [11]. Diese Werte wurden angepasst, da zuerst alle Eigenfrequenzen des Elements mit und ohne ASL systematisch um ca. 5% zu hoch lagen. Die grossen BSP Elemente und die kleinen BSP Prototypen stammen von zwei verschiedenen Herstellern aus unterschiedlichen Ländern. Ein geringer Unterschied in der Steifigkeit erscheint daher plausibel. Weiter wurden aus den Berechnungsergebnissen nur die Ergebnisse jener Knotenpunkte extrahiert, die sich im Bereich des Messrasters befanden.



Abbildung 5: Versuchsaufbau für Schwingungsmessungen mit dem Scanning Laser Doppler Vibrometer an den kleinen BSP-Platten mit und ohne ASL im Leichtbaulabor der Empa.

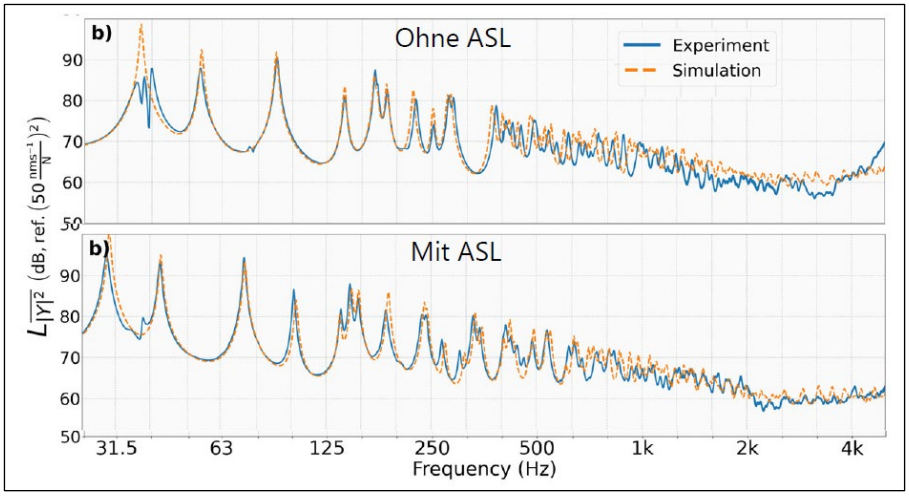


Abbildung 6: Vergleich der örtlich gemittelten Transferadmittanzen der beiden kleinen BSP-Platten aus den Schwingungsmessungen (Experiment) und den FEM-Berechnungen (Simulation).

In Abbildung 7 ist repräsentativ eine Modenform des kleinen ASL-Prototyps dargestellt. Die berechnete Modenform oben stimmt sehr gut mit der gemessenen Schwingungsform überein. Im Bereich der ASL treten hohe Schwingungsamplituden auf, da die ASL bei diesem ersten Experiment noch nicht mit Splitt oder Sand befüllt waren.

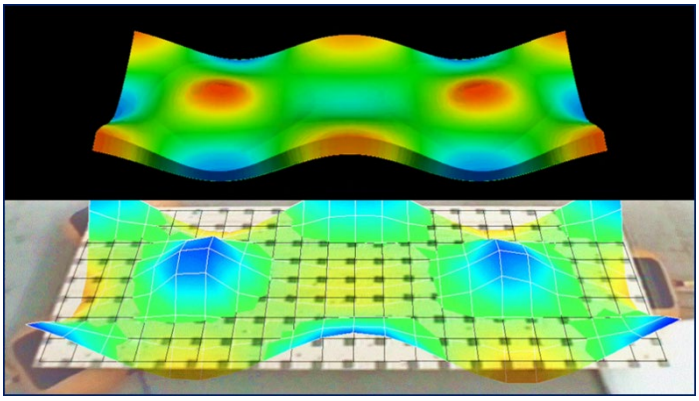


Abbildung 7: Vergleich der Modenform der kleinen BSP-Platte mit ASL aus der FEM-Berechnung (oben) und aus der Schwingungsmessung (unten).

3.3.2. Trittschalldämmung einer Brettsperrholzdecke mit akustischen schwarzen Löchern

Nachdem das Berechnungsverfahren validiert war, wurden damit die geometrischen Parameter der ASL einer bauüblichen Brettsperrholzdecke für Trittschallmessungen im Empa Holzdeckenlabor ausgelegt. Aus zeitlichen Gründen wurde keine systematische Optimierung vorgenommen, es wurden lediglich die Berechnungen für einige wenige ASL Geometrien durchgeführt und ein vielversprechender Kandidat ausgewählt.

Bei der Decke handelt es sich wiederum um eine 200 mm dicke BSP-Decke (5-lagig, Schichtdicke 40 mm) mit der Abmessung 5.73 m (L) x 4.76 m (B), welche aus zwei in etwa gleich grossen Teilelementen zusammengefügt wurde. Zuerst wurde im Empa Holzdeckenlabor die Trittschalldämmung der unbearbeiteten Decke nach EN ISO 10140-3 gemessen (Abbildung 8, links). Anschliessend wurde die Decke wieder ausgebaut und in beide Teilelemente wurden jeweils zwei ASL mit einem Durchmesser von 2.20 m und einer Tiefe von 160 mm gefräst. Danach wurde die Decke erneut im Empa Holzdeckenlabor eingebaut und die vier ASL mit Splitt gefüllt (Abbildung 8, Mitte bzw. rechts). Die Trittschalldämmung der ASL-Rohdecke wurde gemessen, in dem sie mit dem Hammerwerk in den Bereichen zwischen den ASL angeregt wurde und ein zweites Mal nachdem ein Fussbodenaufbau mit schwimmendem Estrich aufgebracht war.

Der Aufbau war von oben nach unten:

- 2 mm PVC Bodenbelag
- 70 mm Zementestrich (vorgefertigte Betonplatte, flächenbezogene Masse 166 kg/m^2)
- 60 mm Trittschalldämmung (30 mm Mineralfaser s' ≤ 6 MN/m3 und 30 mm Mineralfaser s' ≤ 9 MN/m^3)
- 200 mm BSP-Decke mit Splitt gefüllten ASL

In Abbildung 9 sind die gemessenen Norm-Trittschallpegel L_n der drei Bodenaufbauten dargestellt. Die Referenz, das heisst, die Ergebnisse der BSP-Rohdecke ist als blaue Linie dargestellt. Eine signifikante breitbandige Reduzierung der Pegel um bis zu 9 dB ergeben sich durch die vier mit Splitt gefüllten ASL (Abbildung 9, rot). Die Verbesserung beginnt schon bei tiefe Frequenzen erreicht sein Maximum oberhalb 125 Hz. Die Verbesserung nimmt oberhalb von 2000 Hz zu hohen Frequenzen immer weiter ab. In diesem Bereich wird die Holzdecke auf Grund der geringen Kontaktsteifigkeit durch das Hammerwerk nicht effektiv angeregt. Nur im 80 Hz Terzband wurde eine geringfügige Erhöhung der Norm-Trittschallpegel im Vergleich zur Referenzdecke festgestellt. In den Frequenzbändern unterhalb 100 Hz ist die Anzahl der Biegemoden der Decke sehr begrenzt. Die Verschlechterung wird durch eine einzelne Mode verursacht, die sich im Frequenzbereich verschiebt, sehr effizient Schall abstrahlt und nicht durch die ASL beeinflusst wird. Durch eine systematische Optimierung der ASL Geometrie, auch unter Berücksichtigung deren Position auf der Decke können solche Schwachstellen bei zukünftigen Auslegungen sicherlich vermieden werden.



Abbildung 8: Einbau der BSP-Decke im Holzdeckenlabor der Empa für Schallmessungen; links: BSP-Decke ohne ASL als Referenz; mittig: BSP-Deckenprototyp mit ungefüllten ASL; rechts: BSP-Deckenprototyp mit Splitt befüllten ASL.

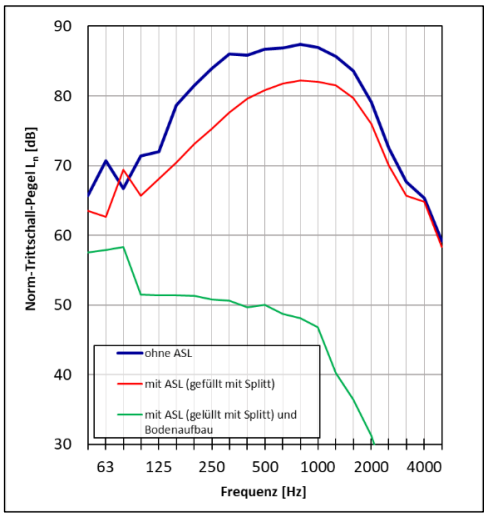


Abbildung 9: Norm-Trittschallpegel gemessen nach EN ISO 10140-3 im Empa Holzdeckenlabor für BSP-Decke ohne ASL (blau), BSP-Decke mit Splitt befüllten ASL ohne Fussbodenaufbau (rot) und BSP-Decke mit Splitt befüllten ASL mit schwimmendem Fussbodenaufbau (grün).

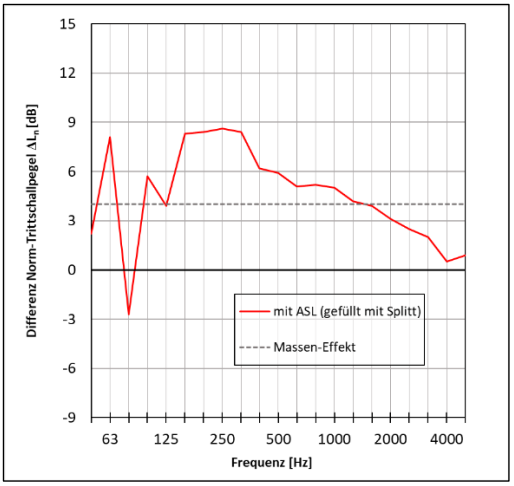


Abbildung 10: Reduzierung des Norm-Trittschallpegel durch Splitt befüllte ASL bezogen auf BSP-Decke ohne ASL (rot) und theoretische Verbesserung gemäss Massen-Effekt.

Die Verbesserung durch die mit Splitt befüllten ASL ist detailliert in Abbildung 10 als Differenz der beiden gemessenen Norm-Trittschallpegel (rote Linie) dargestellt. Durch die höhere Dichte des Splitts im Vergleich zu dem entfernten Holz vergrösserte sich das Gewicht des Deckenelements um knapp 60% im Vergleich zur Rohdecke. Theoretisch verringert sich dadurch gemäss dem Massegesetz der Trittschallpegel um gerade einmal 4 dB. Diese Verbesserung ist ebenfalls in Abbildung 10 als gestrichelte Linie dargestellt. Die gemessene Verbesserung ist jedoch deutlich grösser und somit die Wirkung der ASL zur Reduzierung der Norm-Trittschallpegel nachgewiesen.

Zum Schluss wurden die Trittschalldämmung eines kompletten Fussbodensystems mit ASL zum Vergleich den baurechtlichen Anforderungen und Empfehlungen für erhöhten Trittschallschutz gemessen. Der Frequenzverlauf ist in Abbildung 9 als grüne Linie dargestellt. Wie zu erwarten wird durch den schwimmenden Estrich eine sehr grosse Reduzierung des Trittschallpegels bei mittleren und hohen Frequenzen erreicht. Der gemessene bewertete Norm-Trittschallpegel und die Spektrum-Anpassungswerte betragen $L_{n,W}$ (C_I, $C_{I,50\text{-}2500}$) = 47(-1, 3) dB. Diese sind in der Tabelle 1 den Anforderungswerten aus der SIA 181 [15] und den Empfehlungen der Lignum gegenübergestellt [2]. Diese gelten als erreicht, wenn die entsprechende Einzahlangabe aus der Messung gleich oder geringer als der Anforderungswert ist.

Tabelle 1: Vergleich mit baurechtlichen Trittschallschutz-Anforderungen nach SIA 181 [15] und Empfehlungen der Lignum für Grenzwerte für Trittschallschutz unter Berücksichtigung der Frequenzen bis 50 Hz [2].

	$L_{n,w}$ [dB]	$L_{n,w}+C_i$ [dB]	$L_{n,w}+C_{i,50\text{-}2500}$ [dB]
Messergebnisse: Technolgie-Demonstrator mit ASL und Bodenaufbau	**47**	**46**	**50**
SIA 181 - Mindestanforderung	≤ 53 ☑	≤ 53 ☑	
SIA 181 – erhöhte Anforderung	≤ 49 ☑	≤ 49 ☑	
Lignum – Mindestempfehlung			≤ 58 ☑
Lignum – erhöhte Stufe			≤ 53 ☑
Lignum – höchste Stufe			≤ 49 ☒

Hinweise zur Beurteilung in der Tabelle:

- *Die Anforderungswerte gelten für einen Wohnraum mit mittlerer Lärmempfindlichkeit, z. B. Wohnzimmer, Schlafzimmer, Büro.*
- *Die Anforderungen gelten für die Übertragung im Gebäude unter Berücksichtigung aller Nebenwege. Diese sind hier nicht berücksichtigt, sie werden jedoch wegen dem schwimmenden Fussbodenaufbau zur Trittschalldämmung als zweitrangig eingestuft.*
- *Als Anforderungswerte gelten die bewerteten Standard-Trittschallpegel $L'_{nT,w}$, die das Raumvolumen des Empfangsraums berücksichtigen. Bei üblichen Raumvolumen >30 m^3 sind diese Werte kleiner als die hier angegeben gemessenen normierten Grössen.*
- *Es sind keine Projektierungszuschläge (Sicherheitsbeiwerte) berücksichtigt.*

Die baurechtlichen Anforderungswerte sind gut eingehalten. Nach SIA 181 sind sie abhängig von der Lärmbelastung im Senderaum und der Lärmempfindlichkeit des Empfangsraums. In der Tabelle 1 sind die Anforderungswerte für Räume mit mittlere Lärm-empfindlichkeit, wie Schlafzimmer, Wohnzimmer, Büros oder Schulzimmer, für in Wohngebäuden übliche mässig Lärmbelastung, aufgeführt. Diese müssen als bewertete Standard-Trittschallpegel $L_{nT,w}$ im fertiggestellten Gebäude, das heisst unter Berücksichtigung des Empfangsraumvolumens und inklusive der Flankenübertragung, eingehalten werden. In den Messergebnissen ist die Flankenübertragung nicht berücksichtigt. Ein schalltechnisch günstiger Fussbodenaufbau, wie bei der ASL Decke, reduziert jedoch auch die Trittschall-Flankenübertragung, so dass in den allermeisten Fällen, nur die Direktübertragung für die Beurteilung massgeblich ist. Die gemessenen Norm-Trittschallpegel können in die Standard-Trittschallpegel umgerechnet werden. Bei Räumen mit einem Volumen >30 m^3, also für übliche Aufenthaltsräume, sind die Standard-Trittschallpegel geringer als die Norm-Trittschallpegel und somit auf der sicheren Seite. Bei kleinen Empfangsräumen mit einem Volumen <30 m^3 sind die Standard-Trittschallpegel grösser als die Norm-Trittschallpegel. Jedoch trifft dies jedoch meistens auf Badezimmer, Küchen und WC zu. Hier ist die Lärmempfindlichkeit gering und somit sind die Anforderungswerte wiederum 5 dB weniger streng.

Die empfohlenen Trittschallgrenzwerte von Holzdecken der Lignum sind in der Regel schwieriger zu erreichen, da der tieffrequente Trittschallschutz bis 50 Hz berücksichtigt wird. Es gelten die gleichen Bedingungen für Flankenübertragung und Raumvolumen wie bei den baurechtlichen Anforderungen. Aber selbst hier erfüllt die ASL-Decke die Empfehlungen für Mindestanforderungen, sowie für die erhöhte Stufe sehr gut. Nur der Grenzwert für die höchste Schallschutzstufe wird nur knapp um 1 dB verfehlt. Es ist als realistisch einzuschätzen, dass die Trittschalldämmung der ASL Decke mit einer systematischen Optimierung der ASL Geometrie und deren Anordnung, sowie einem optimierten Fussbodenaufbau, um einige Dezibel weiterverbessert werden kann, so dass auch dieser Grenzwert erfüllt wird.

4. Schlussfolgerung

Akustische schwarze Löcher (ASL) sind zur Verbesserung der Trittschalldämmung von Massivholzdecken geeignet. Die Befüllung der ASL mit Splitt dämpft die Deckenschwingungen, so dass sich eine signifikante Gewichtseinsparung und Reduzierung der Aufbauhöhe im Vergleich zu den heute üblichen vollflächigen bis zu 12 cm dicken Splittschüttungen, welche in erster Linie den Effekt der Beschwerung nutzen, ergibt. Die ASL sind schon bei tiefen Frequenzen wirksam, die bei leichten Decken als besonders störend wahrgenommen werden.

Im Laborversuch wurde mit einem Brettsperrholz-Deckenprototyp mit ASL nachgewiesen, dass die baurechtlichen Anforderungen nach SIA 181 sowie auch die strengeren Empfehlungen der Lignum an den tieffrequenten Trittschallschutz in der Schweiz erfüllt werden können. Die ASL Geometrie und deren Anordnung wurde für diesen Deckenprototyp aus Zeitgründen noch nicht systematisch optimiert. Die Anforderungen anderer Planungsdisziplinen wurden in Erwägung gezogen, aber noch detailliert untersucht.

Des weiteren wurde in dem Projekt ein effizientes, breitbandiges Rechenmodell für den Trittschallschutz, welches auf der Finiten Elemente Methode basiert entwickelt und validiert. Dieses Modell wird für eine systematische Optimierung und Weiterentwicklung der ASL bei Massivholzecken auch unter Berücksichtigung anderer Planungsdisziplinen in Nachfolgeprojekten verwendet.

5. Danksagung

Die Autoren danken der Umwelttechnologieförderung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) der schweizerischen Eidgenossenschaft für die finanzielle Unterstützung des Projekts «Trittschalldämmung von Massivholzdecken mit akustischem schwarzen Loch (TriMASL)», sowie den Firmen Strüby Holzbau AG, Seewen (SZ) und Timber Structures 3.0 AG, Thun für die Unterstützung bei Herstellung, Fertigung und Einbau der Prüfobjekte.

6. Referenzen

[1] B. Rasmussen and M. Machimbarrena, «COST Action TU 0901–building acoustics throughout Europe. Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe», 2014

[2] «Lignum-Dokumentation Schallschutz im Holzbau», Lignum, Empa, 2023

[3] A. Homb, C. Guigou-Carter, and A. Rabold, «Impact sound insulation of cross-laminated timber/massive wood floor constructions: Collection of laboratory measurements and result evaluation», Building Acoustics, vol. 24, no. 1, pp. 35–52, 2017

[4] www.lignum-data.ch, Online Bauteilkatalog

[5] Schoenwald, S., & Vallely, S. «Cross laminated timber elements with functional grading and localised ballast to improve airborne and impact sound insulation». In Forum Acusticum 2023. Convention of the European Acoustics Association, 2023

[6] Schoenwald, S., & Vallely, S. «wenn schwarze Löcher Trittschall schlucken». Tagungsband BauphysikerInnen-Treffen 2023. Wien, 2023

[7] M. Mironov, «Propagation of a flexural wave in a plate whose thickness decreases smoothly to zero in a finite interval», 1988.

[8] A. Pelat, F. Gautier, S. C. Conlon, and F. Semperlotti, «The acoustic black hole: A review of theory and applications», Journal of Sound and Vibration, vol. 476, p. 115316, 2020

[9] V. V. Krylov, «New type of vibration dampers utilizing the effect of acoustic 'black holes'», Acta Acustica united with Acustica, vol. 90, no. 5, pp. 830–837, 2004

[10] E. Bowyer and V. Krylov, «Damping of flexural vibrations in turbofan blades using the acoustic black hole effect», Applied Acoustics, vol. 76, pp. 359–365, 2014

[11] S. Vallely and S. Schoenwald, «An efficient analytical method to obtain the homogenised frequencyindependent elastic material properties of cross laminated timber elements», Journal of Sound and Vibration, vol. 546, p. 117424, 2023

[12] Hashimoto, N. «Measurement of sound radiation efficiency by the discrete calculation method», Applied Acoustics 62.4 p. 429-446, 2001

[13] Conta, Simone, Andrea Santoni, and Anders Homb. «Benchmarking the vibration velocity-based measurement methods to determine the radiated sound power from floor elements under impact excitation», Applied Acoustics 169, 2020

[14] EN ISO 10140-3, «Akustik – Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand – Teil 3: Messung der Trittschalldämmung», 2021

[15] SIA 181, «Schallschutz im Hochbau», 2020

Stoßstellendämm-Maße im Massivholzbau

Messungen und Finite Element – Berechnungen

Stefan Grießhammer
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland

Mitautoren:
Andreas Rabold und Silas Pfattheicher
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Motivation Modulbauweise

Die Holzmodulbauweise stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, um den Holzbau in Markbereichen zu etablieren, in denen er bisher weniger präsent ist. Durch die horizontale und vertikale Reihung wiederkehrender Raummodule mit ähnlichen Anforderungen an die Nutzung eignet sich die Modulbauweise insbesondere für den Objektbau, z.B. in Schulen und Hotels. Bei diesen Gebäudetypen sind Anforderung an den Schallschutz von wesentlicher Bedeutung, allerdings basieren bisherige Planungswerte auf eigenen Messdaten der Hersteller. Noch fehlt es an bewährten Konstruktionen, weshalb in einem aktuellen Forschungsvorhaben [1] normungsfähige Planungsdaten für die Modulbauweise ermittelt und aufbereitet werden.

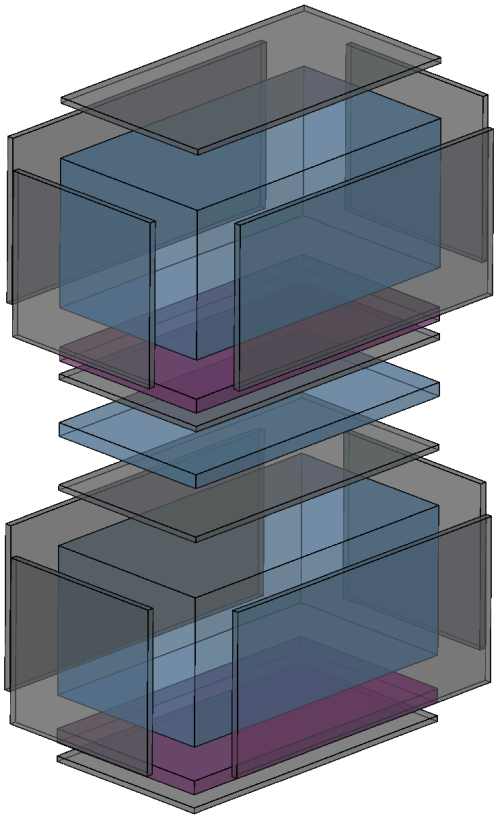


Abbildung 1: Explosionsdarstellung zweier vertikal gestapelter Raummodule

Die Hersteller der Raummodule setzen als tragende Bauteile häufig flächige Massivholzelemente wie z.B. Brettsperrholz (CLT) ein. Daher spielt das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} eine wesentliche Rolle zur Charakterisierung der schalltechnischen Entkopplung der Raumodule.

Durch die horizontale und vertikale Reihung der Module in Gebäuden der Holzmodulbauweise ergeben sich gegenüber der klassischen Massivholzbauweise abweichende Situationen an den Bauteilstößen. Es liegen zwangsläufig zweischalige Trennbauteile auf dem vertikalen (Decke) sowie horizontalen (Wand) Übertragungsweg vor, weil die Raummodule als funktionsfähige Einheit vorgefertigt sind.

Die Raummodule sind bei den Herstellern in unterschiedlichen Ausbaustufen erhältlich, werden jedoch im Sinne einer möglichst kurzen Montagezeit auf der Baustelle mit einem sehr hohen Grad an Vorfertigung produziert. Konkret zeichnen sich die Module neben finalen Sichtoberflächen der Bauteile auch schon durch vorbereitete Installationen (Elektro/Lüftung) sowie enthaltenes Mobiliar aus. In den Raummodulen werden werksseitig häufig auch schon so genannte Badmodule montiert, deren Einfluss auf den Schallschutz ebenfalls im Rahmen des Forschungsvorhabens [1] untersucht worden ist.

Die schalltechnische Entkopplung der Module erfolgt seitens der Hersteller meist durch elastische Baulager, wie z.B. Elastomere, deren Dimensionierung überwiegend auf statischen Vorgaben basiert. Die Kopplung der Raummodule durch Verbindungsmittel ist herstellerspezifisch unterschiedlich gelöst.

Im Rahmen des Themenblocks *« Schallschutz im Holzbau – Neue Aspekte »*, soll zunächst der Ansatz beschrieben werden, Stoßstellendämm-Maße mittels der Finiten Element Methode (FEM) zu simulieren und gegenüber Messdaten zu validieren. Die K_{ij}–Werte können aus Messungen der Schnellepegeldifferenz in beiden Richtungen über die Stoßstelle ermittelt werden. Dieser Messansatz kann analog mittels der FEM nachgestellt sowie im Postprocessing die Verläufe und Einzahlwerte für K_{ij} berechnet werden. Langfristig sollen Materialparameter-Untersuchungen möglich sein, beispielsweise hinsichtlich der Baulager.

Weiterhin werden K_{ij}-Messwerte für die Modulbauweise präsentiert, insbesondere im Hinblick auf verschiedene Stoßausführungen sowie den Einsatz von Verbindungsmitteln und Entkopplungsmaßnahmen.

1. Stoßstellendämm-Maß

1.1. Anwendung

Im Rahmen der Nachweisführung Luftschall muss das um die Prognoseunsicherheit u_{progn} reduzierte Bauschalldämm-Maß R'_w (1) den Mindestwert erreichen bzw. übertreffen.
Zur differenzierten Berücksichtigung der Flankenübertagung müssen alle relevanten Flankendämm-Maße $R_{ij,w}$ berechnet werden (2). Neben den Eigenschaften der Flanken, etwaigen Vorsatzkonstruktionen und der Trennfläche ist auch eine Charakterisierung der Stoßstelle erforderlich. Den Rechenwert hierfür bildet das Stoßstellendämm-Maß K_{ij}.
Es handelt sich um die Größe zur Beschreibung der Minderung der Körperschallübertragung an einer im Übertragungsweg liegenden Diskontinuität. Die Berechnung des Stoßstellendämm-Maßes erfolgt frequenzabhängig. Der Einzahlwert im Rahmen der bauakustischen Nachweisführung ergibt sich als arithmetischer Mittelwert der frequenzabhängigen Mess-/Simulationsergebnisse von 200 bis 1250 Hz.
K_{ij} kann aus Messungen/Simulationen der Schnellepegel-Differenz $D_{v,ij}$ in beiden Richtungen über die Stoßstelle und der Körperschall-Nachhallzeit T_s der beiden Bauteile *i* und *j* ermittelt werden (3, 4, 5). Nachfolgend sind die wesentlichen Gleichungen aufgeführt, genauere Informationen sind insbesondere der Normenreihe *DIN EN ISO 10848* [2] zu entnehmen.

$$R'_w = -10 \log \left(10^{-0,1 \cdot R_{Dd,w}} + \sum_{i=1}^{n_f} 10^{-0,1 \cdot R_{Ff,w,i}} + 10^{-0,1 \cdot R_{Fd,w,i}} + 10^{-0,1 \cdot R_{Df,w,i}} \right) \quad (1)$$

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w}}{2} + \frac{R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 \cdot l_f} \quad (2)$$

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + 10 \lg \left(\frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \right) \quad (3)$$

$$a_j = \frac{2,2\ \pi^2 \cdot S_j}{T_{s,j} \cdot c_0 \cdot \sqrt{\frac{f}{f_{Ref}}}} \quad (4)$$

$$T_s = \frac{2,2}{f \cdot \eta_{tot}} \quad (5)$$

Im Rahmen der Nachweisführung Trittschall ist in Anlehnung an *DIN EN 12354-2* [3] eine differenzierte Betrachtung der Flankenübertragungswege möglich. Zunächst erfolgt hier die Berechnung der bewerteten Norm-Trittschallpegel auf den Wegen D_f (Deckenauflager) und D_{Ff} (Estrichschicht), unter Berücksichtigung der Verbesserung des Stoßstellendämm-Maßes durch elastische Zwischenlagen ΔK_{ij}. Dies ergibt sich durch die Differenz aus Stoß mit (elastischer) Zwischenlage zu starren Stoß.

$$L_{n,Df,w} = L_{n,Df,lab,w} - \Delta R_{j,w} - \Delta K_{ij} - 10 \log \frac{S_i}{l_0 \cdot l_{ij}} \quad (6)$$

$$L_{n,DFf,w} = L_{n,DFf,lab,w} - \Delta R_{ij,w} - \Delta K_{ij} - 10 \log \frac{S_i}{l_0 \cdot l_{ij}} \quad (7)$$

1.2. Messung

In diesem Abschnitt erfolgt eine knappe Beschreibung des Mess-Setups, welches im Forschungsvorhaben [1] zur Bestimmung der Stoßstellendämm-Maße herangezogen wurde. Gleichzeitig dient der Abschnitt einem besseren Verständnis des Simulationsablaufes mit der FEM.

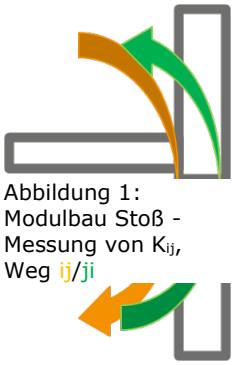


Abbildung 1: Modulbau Stoß - Messung von K_{ij}, Weg ij/ji

Grundsätzlich erfolgt die Messung von K_{ij} durch eine Körperschallanregung eines Bauteils und gleichzeitige Messung der Reaktion der verbundenen Bauteile. Die Anregung wurde realisiert mittels Shaker und Sweep-Signal (50-5000 Hz). Aus praktischen Gründen war der Shaker durch eine Stockschraube mit dem anzuregenden Bauteil verschraubt (vgl. Abbildung 3).

Die Schwingungsantwort der Bauteile wurde mittels Beschleunigungsaufnehmern gemessen. Diese wurden magnetisch an, mit den Bauteilen verschraubten, Unterlegscheiben befestigt (vgl. Abbildung 4).

Auf jedem Bauteil wurden vier Shaker-Positionen mit jeweils drei zugehörigen Mess-Positionen definiert. Die Abstände zu den Plattenrändern, die Mindestabstände zwischen Anrege- und Mess-Punkten sowie zwischen den Mess-Punkten untereinander wurde gemäß [2] eingehalten. Die Festlegung der Punkte erfolgte durch das Messteam vor Ort, wobei eine gleichmäßige Verteilung auf den Bauteilen berücksichtigt wurde.



Abbildung 2: Shaker zur Bauteilanregung mittels Sweep-Signal (hier montiert an CLT-Decke)



Abbildung 3: Beschleunigungsaufnehmer zur Bestimmung der Bauteilschnelle (magnetische Befestigung an verschraubter Unterlegscheibe)

2. FEM-Simulationen

Planungswerte für Stoßstellendämm-Maße im Massivholzbau basieren aktuell auf Messungen an Bauteilprüfständen. Sie müssen für unterschiedliche Stoßsituationen, abweichende Konstruktionen sowie den Einsatz von elastischen Baulagern wiederkehrend durchgeführt werden. Dies bedeutet somit einen nicht unerheblichen Zeit- und Kostenfaktor für Hersteller, Planer und Bauherren.
Eine vielversprechende Herangehensweise besteht darin, auf die Finite-Element-Methode (FEM) zurückzugreifen, die bereits in vielen Ingenieurdisziplinen alltäglich ist. Der Messaufbau des Stoßstellendämm-Maßes kann anschaulich in einer Simulationsumgebung nachgestellt werden, im aktuellen Forschungsprojekt [1] erfolgt die Umsetzung mit der Software *ANSYS Mechanical*. Zwingend erforderliche Messdaten dienen dabei der Validierung des Simulationsmodells. Basierend auf einem gefitteten Modell können Variationen der Bauteilgeometrie oder der Materialparameter erfolgen und zukünftig effizient neue Planungswerte für K_{ij} generiert werden.

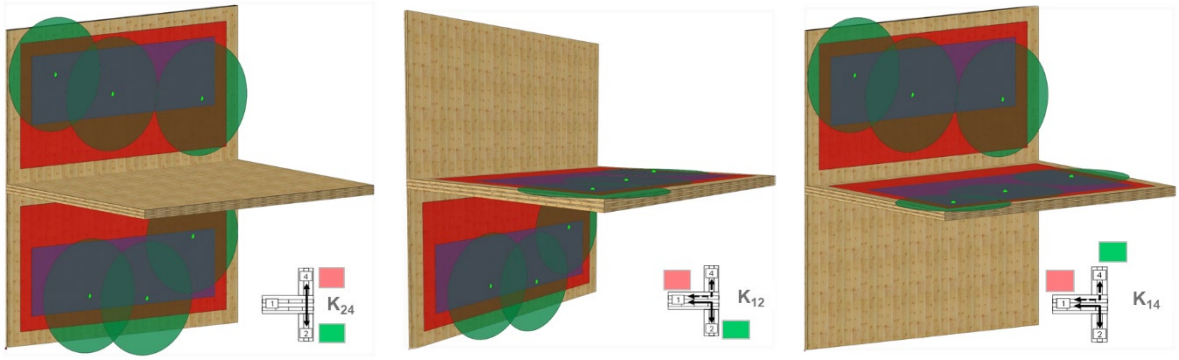
2.1. Allgemeines

Die Holzmodulbauweise zeichnet sich aufgrund der horizontalen und vertikalen Reihung der Raummodule zwangsläufig durch zweischalige Wand-/Deckenaufbauten aus. Zunächst empfiehlt es sich daher, die FEM-Modellierungen an einer vereinfachten Geometrie durchzuführen, weshalb zunächst ein starrer Brettsperrholz T-Stoß betrachtet wird (vgl. Abbildung 5). Hierbei sind die Einflussfaktoren auf die Modellierung nachvollziehbarer, zumal auch eine Mehrzahl an Referenzkurven für den Modellabgleich zur Verfügung stehen.

Der Simulationsablauf soll im Folgenden kurz erläutert werden:

- Import/Anpassung der Geometriedatei in *ANSYS*
- Festlegen/Zuweisen der Materialparameter
- Definition der Randbedingungen (Lagerung)
- Vernetzung der Geometrie *(bis hier → Preprocessing)*
- Durchführung der Harmonischen Analysen zur Simulation von Bauteilanregung und Bestimmung der Bauteilantwort *(→ Solution)*
- Externe Berechnung des Stoßstellendämm-Maßes K_{ij} aus den simulierten Bauteilschnellen *(→ Postprocessing)*

Nachfolgend sind die zu untersuchenden Übertragungswege am T-Stoß abgebildet.

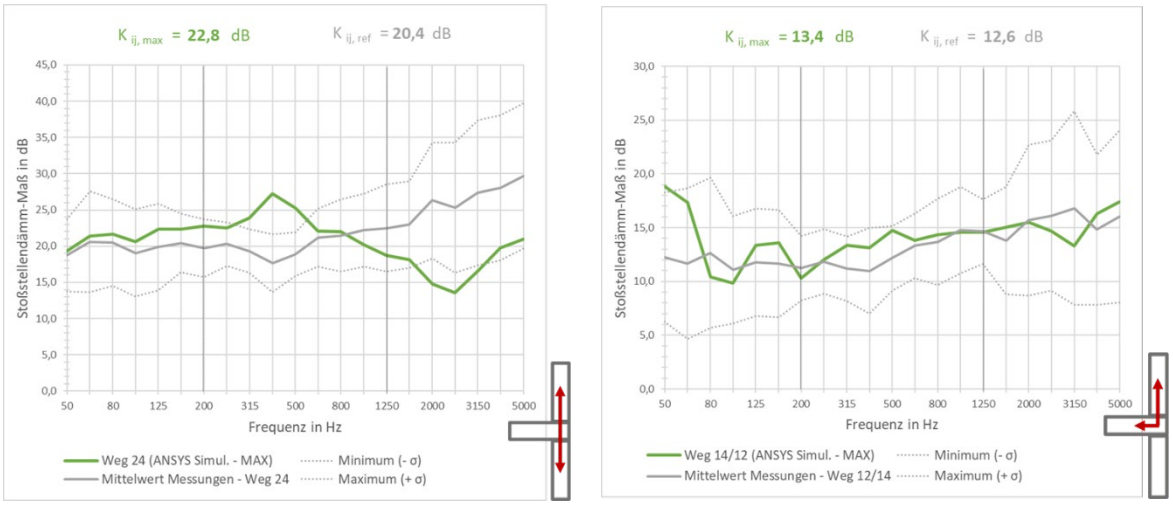


Vertikale Übertragung Gemischte Übertragungswege

Abbildung 4: Übersicht der drei relevanten Übertragungswege am untersuchten, starren Brettsperrholz T-Stoß (grün: Shakerpunkt, rot: zulässiger Messbereich der Bauteilschnelle)

2.2. Ergebnisse starrer T-Stoß

Die FEM-Simulationsergebnisse am starren T-Stoß stimmen sowohl auf dem vertikalen Übertragungsweg *Ff* (Flanke-Flanke) als auch auf den gemischten Wegen *Fd* (Flanke-Decke) recht gut mit den Referenzwerten überein. Die grauen Referenzkurven stellen einen Mittelwert aus mehreren Prüfstands Messungen von geometrisch identischen, starren T-Stößen dar. Insbesondere auf dem Weg *Fd* liegt die FEM-Kurve über den gesamten Frequenzbereich vollständig im Toleranzbereich der Mess-Standardabweichung. Auf dem vertikalen Übertragungsweg *Ff* bricht das simulierte K_{ij} ab ca. 800 Hz gegenüber den Messwerten ein. Ursächlich hierfür kann die die als komplett starr angenommene Kontaktbedingung in der Stoßfuge angesehen werden, in der Simulation wurden die im Prüfstand vorhandenen Verbindungsmittel bisher nicht berücksichtigt (vgl. Abbildung 6).



Weg Ff Weg Fd

Abbildung 5: Simulations-Ergebnisse des starren Brettsperrholz T-Stoßes auf den Übertragungswegen Ff und Fd (grün: FEM; grau: Referenz als Mittelwert aus Prüfstands Messungen)

Die vorliegende Übereinstimmung von Messung und Simulation konnte erst durch die Annahme von hohen Dämpfungswerten in Form des globalen Verlustfaktors η_{tot} in *ANSYS* erreicht werden. Die Verlustfaktoren des Brettsperrholzes sind dabei frequenzabhängig definiert (APDL-Code) und basieren auf Messwerten. Um den Faktor 2 erhöhte Werte für η_{tot} erwiesen sich als passend, um die gewünschte Übereinstimmung der Messwerte mit den FEM-Kurven zu erreichen (vgl. Kap. 2.3).
Dennoch war eine genauere Untersuchung der in der Simulation berücksichtigten Dämpfungsmechanismen erforderlich, weshalb im Folgenden, die im Rahmen einer Masterarbeit [4] durchgeführten Messungen zur Ausbreitungsdämpfung an CLT-Elementen, nachmodelliert wurden.

2.3. Ausbreitungsdämpfung

Das Simulationsmodell basiert auf einem im Prüfstand gemessenen Wand-Wand-Stoß mit durchlaufender Flanke. Die Länge der durchlaufenden Flanke aus 3S-80 mm CLT beträgt 10,0 m. Über die Wandhöhe von 2,70 m sind drei Messreihen angeordnet, wobei die Messpunkte einheitliche Abstände von 26 cm aufweisen. Vor und hinter dem angeschlossenen Wandelement wurden gleichermaßen je 16 Messpunkte für Beschleunigungsaufnehmer verteilt. Am Beginn jeder Messreihe ist der Anregungspunkt mit dem Shaker platziert. Somit kann in Abhängigkeit der Entfernung vom Shakerpunkt die Pegelabnahme im CLT-Element gemessen/simuliert und daraus die Ausbreitungsdämpfung (in dB/m) ermittelt werden. Inhomogenitäten konnten durch die Mittelungen über die drei Messreihen sowie der Wege hin und zurück ausgeschlossen werden.

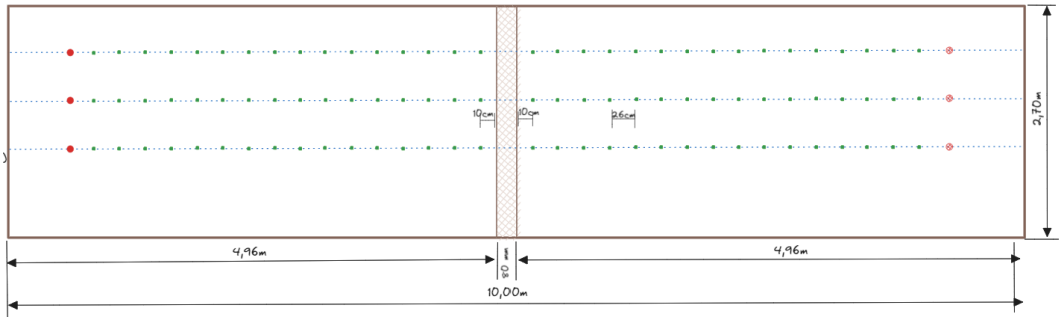
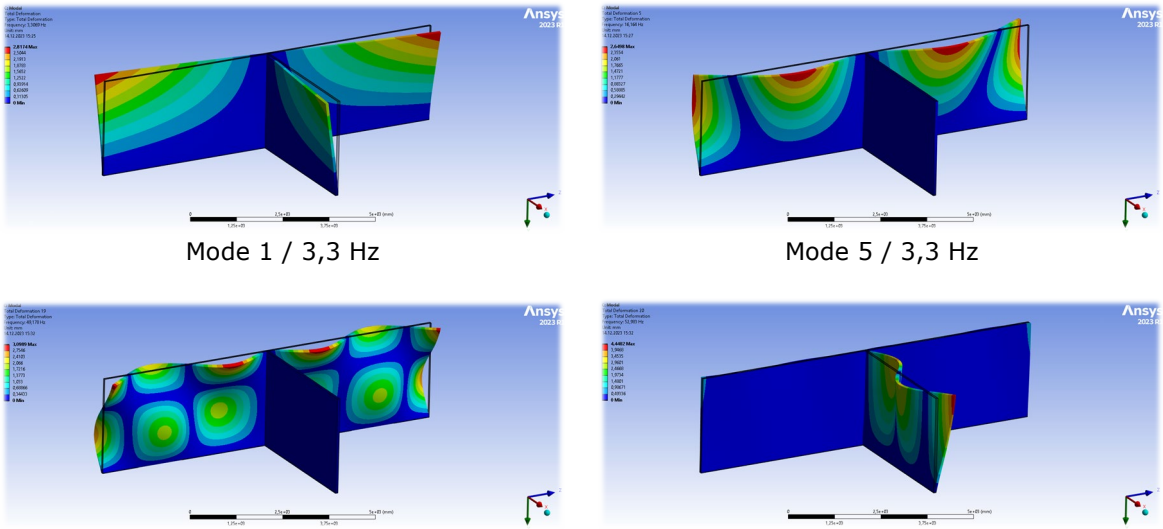


Abbildung 6: Mess-/Simulationsaufbau zur Bestimmung der Ausbreitungsdämpfung in der durchlaufenden Brettsperrholz-Wand (Ansicht auf Flanke)

Die Ausbreitungsdämpfung wurde durch Harmonische Analysen in *ANSYS* bestimmt, ergänzend ist auch eine Modalanalyse des Modells durchgeführt worden (vgl. Abbildung 8). Die Wandfußpunkte wurden eingespannt auf einer Elastomer-Schicht gelagert, die oberen Wandenden sind wie im Messaufbau frei verschieblich definiert. In der Stoßfuge ist eine konforme Vernetzung gewählt, die als vollständig gekoppelt zu bewerten ist. Bei niedrigen Frequenzen bis 50 Hz zeigt sich auch visuell sehr deutlich das modale Plattenverhalten der Massivholzelemente. Das Schwingungsverhalten spiegelt sich auch deutlich in den frequenzabhängigen Pegelverläufen wieder (vgl. Abbildung 9).



Mode 1 / 3,3 Hz | Mode 5 / 3,3 Hz

Mode 19 / 49,2 Hz | Mode 20 / 53,0 Hz

Abbildung 7: Exemplarische Schwingungen (Modalanalyse) des untersuchten Wand T-Stoßes

Exemplarisch werden in Abbildung 9 die Auswertungen der Schnelle-Pegel in Abhängigkeit der Entfernung zum Shakerpunkt bei 80 und 5000 Hz gezeigt. In beiden Fällen ist eine Abnahme der Pegel anhand der fallenden Ausgleichsgeraden erkennbar, wie zu erwarten wesentlich deutlicher bei hohen Frequenzen. Tieffrequent ist das modale Plattenverhalten anhand des harmonisch schwankenden Pegels ersichtlich. Dabei ist ein Sprung im Bereich der Stoßstelle der Wand (rot gestrichelt) erkennbar. Überraschend gut ist die Reproduzierbarkeit der Messkurven durch die FEM-Simulation, insbesondere hinsichtlich der qualitativen Graphenverläufe.

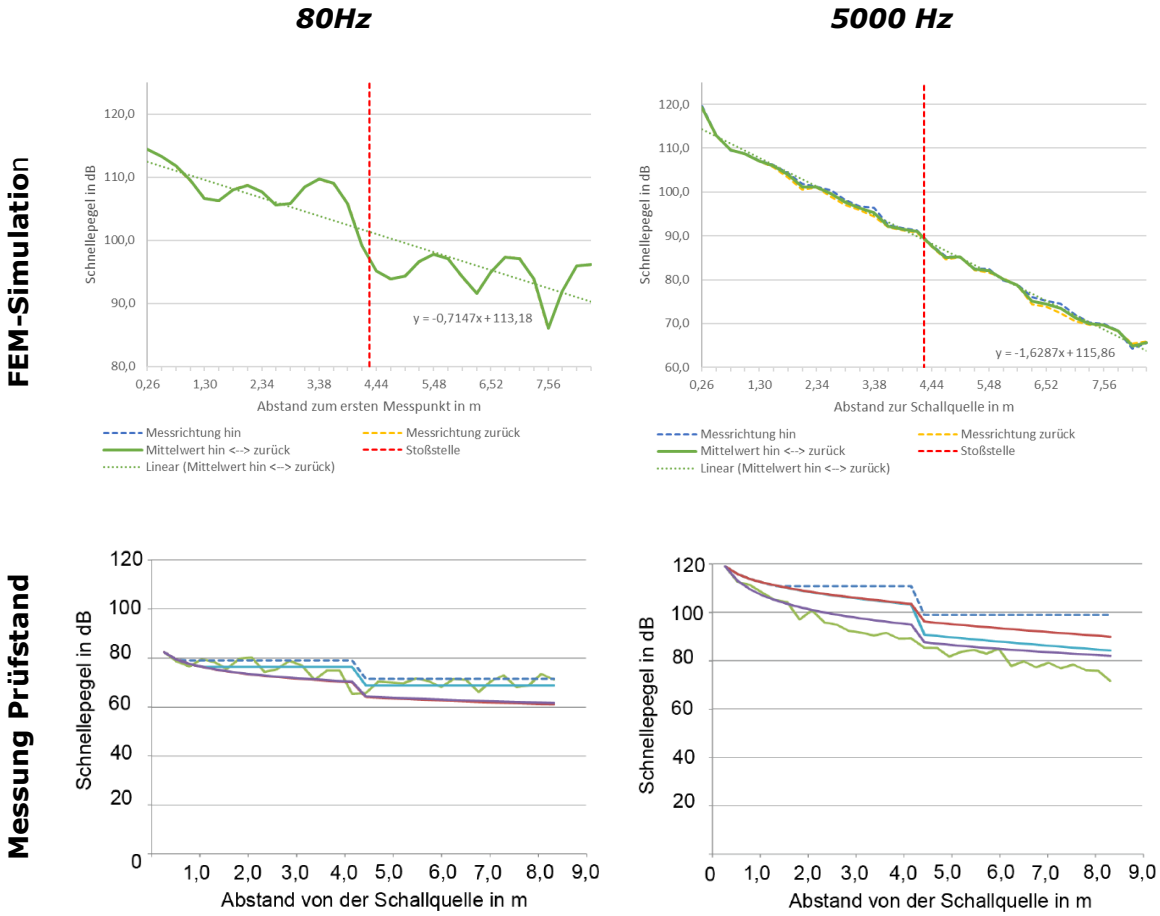


Abbildung 8: Vergleich von Simulations-/Messergebnissen zur Abnahme der Schnelle Pegel in Abhängigkeit vom Abstand zum Shakerpunkt, bei exemplarischen Frequenzen

- Deutliches modales Verhalten bei 80 Hz erkennbar, Sprung an der Stoßstelle
- Deutlich negative Steigung der Ausgleichsgerade bei 5000 Hz zeigt die zu hohen Frequenzen hin ansteigende Ausbreitungsdämpfung
- Gute Übereinstimmung von Messung und Simulation (jeweils grüne Kurven)

Werden die Steigungen der Ausgleichgeraden über Terzfrequenzen von 50 bis 5000 Hz aufgetragen, kann direkt eine Gegenüberstellung zwischen gemessener und simulierter Ausbreitungsdämpfung erfolgen (s. Abbildung 10). Die rote Messkurve wird dabei von der grünen, simulierten Kurve über den gesamten Frequenzbereich abgedeckt.
Diese Übereinstimmung wurde erreicht, indem der globale Verlustfaktor η_{tot} des Brettsperrholzes um den Faktor 2 erhöht worden ist (vgl. Abbildung 11). In den gemessenen Verlustfaktoren von CLT (rote Kurve) ist die Ausbreitungsdämpfung nicht enthalten, weshalb in der Simulation erhöhte η_{tot} angenommen werden müssen.
Bei der Berechnung des Stoßstellendämm-Maßes K_{ij} wird durch diese «Überdämpfung» kein Fehler gemacht, denn der verdoppelte Verlustfaktor wird durch die äquivalenten Absorptionslängen (s. Gleichung (3)) heraus korrigiert. Der globale Verlustfaktor geht in die Berechnung der Absorptionslängen über die Körperschallnachhallzeit ein.



Abbildung 9: Gegenüberstellung von Simulations- und Messergebnissen der Ausbreitungsdämpfung in den CLT-Elementen.

In der FEM-Simulation wird die Ausbreitungsdämpfung in den Massivholzelementen berücksichtigt, die Ausbreitungsdämpfung steigt zu höheren Frequenzen hin an.

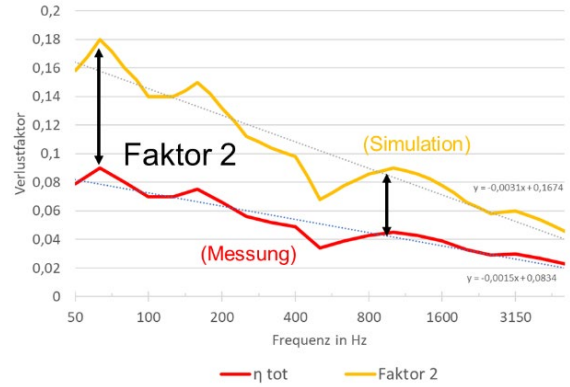


Abbildung 10: Gegenüberstellung von Messwerten und in der FEM-Simulation angenommenen Werten des globalen Verlustfaktors η_{tot} (für CLT)

Der Faktor 2 wird erforderlich, um die Ausbreitungsdämpfung (vgl. Abbildung 10) abzubilden und somit die Verläufe von K_{ij} richtig zu simulieren.

2.4. Ausblick entkoppelter T-Stoß

Mit FEM berechnete, durch Baulager entkoppelte T-Stöße, ergeben noch deutlich zu hohe K_{ij}-Werte. Durch durch die Berücksichtigung der Pressung in der Fuge sowie optimierte Materialparameter der Lager ist eine Annäherung an die Referenzkurven möglich.

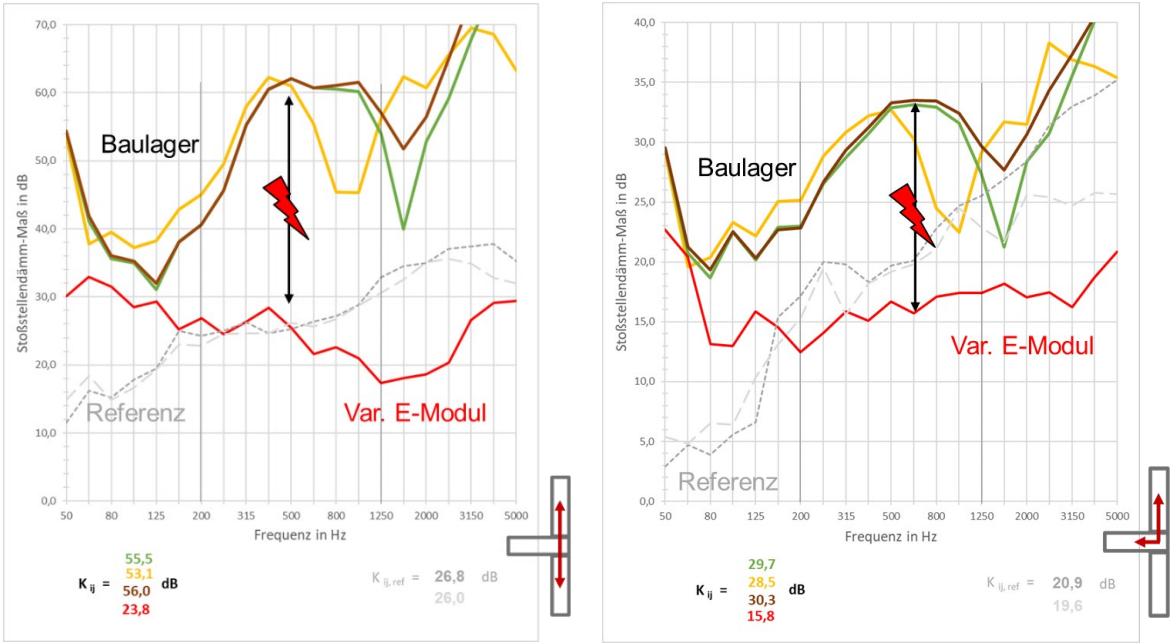


Abbildung 11: Erste Auswertungen eines mit FEM simulierten, entkoppelten T-Stoßes

3. Messungen im Forschungsvorhaben

Neben den Ansätzen zur FEM-Simulation von Stoßstellendämm-Maßen, sollen auch aktuelle Messdaten aufgezeigt werden. Im Rahmen eines von der *TH Rosenheim* und des *ift Rosenheim* durchgeführten Forschungsvorhabens [1] wurden in Zusammenarbeit mit drei Modulherstellern Messungen an deren bereitgestellten Mockups durchgeführt. Neben den Messungen zur Luft- und Trittschalldämmung – auch an den verbauten Badmodulen – wurden Stoßstellendämm-Maße zwischen den Raummodulen gemessen.

3.1. Mess-/Prüfaufbauten

Die Messungen der Stoßstellendämm-Maße fanden bei zwei unterschiedlichen Herstellern statt. Es wurden jeweils Mockups bestehend aus 3 Raummodulen zur Verfügung gestellt, die L-förmig angeordnet waren (vgl. Abbildung 13 & Abbildung 14). Die relevanten Wand- und Boden/Decken-Aufbauten sind in der nachfolgenden Übersicht dargestellt.
Bei Hersteller 1 lag als Trenndecke der übereinander stehenden Module eine Kombination von Holzbalken- und CLT-Decke (Boden oben/Deckel unten) vor.
Bei Hersteller 2 wurde die Trenndecke einerseits als vollständige Holzbalken-, andererseits vollständige CLT-Decke ausgeführt. Der Wechsel zwischen den beiden Varianten konnte durch Austausch der übereinander liegenden Module realisiert werden.

Hersteller 1			**Hersteller 2**		
(Trenn-) Wand		(120) 100 mm CLT	(Trenn-) Wand		80 mm MH-Steher
Decke	HBD	200 mm HBD	Decke A	HBD	160 mm HBD
	CLT	80 mm CLT		HBD	120 m HBD
			Decke B	CLT	120 mm CLT
				CLT	60 mm CLT



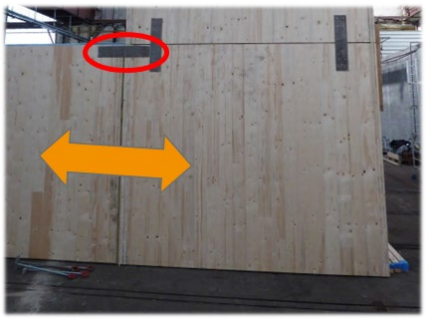
Abbildung 12: Mockup 1



Abbildung 13: Mockup 2

3.2. Einfluss der Verbindungsmittel

Im Folgenden werden die Einflüsse von erforderlichen Verbindungsmitteln auf die Stoßstellendämm-Maße bei den beiden Herstellern exemplarisch aufgezeigt.



A) Stahllaschen

Bei Hersteller 1 wurden 5mm dicke Stahlbleche geprüft, die außen an die Raummodule angeschraubt worden sind. Dadurch fand auf dem horizontalen Übertragungsweg ins Nachbarmodul eine Überbrückung der komplett durchgehenden 30 mm Modulfuge statt. Die Modulwände sind aus CLT-Elementen gefertigt. Der Verzicht auf die Stahllaschen ist lt. Hersteller bis zur GK 3 möglich.
Deutlich bemerkbar macht sich die Kopplung durch die Laschen ab 500 Hz, insbesondere auf dem Pfad Ff ergibt sich eine deutliche Reduktion des K_{ij}. Die Bleche führen zu einer Verschlechterung von ca. 10 dB, weil die Übertragungssituation der einer durchgehenden Flanke nahe kommt. Die zweischalige CLT-Modultrennwand hat nur noch geringen Einfluss auf das Stoßstellendämm-Maß.
Ähnlich verhält es sich auf dem Übertragungsweg Fd, wobei der Effekt hier geringer ausfällt. Die Schallenergie muss hier eine Stoßfuge weniger überbrücken, weshalb der Einzahlwert ohne Stahlblech nur bei 23,3 dB liegt. Entsprechend ist auch der Effekt der Kopplung kleiner, die Reduktion des K_{ij} beträgt ca. 3,5 dB (vgl. Abbildung 15).

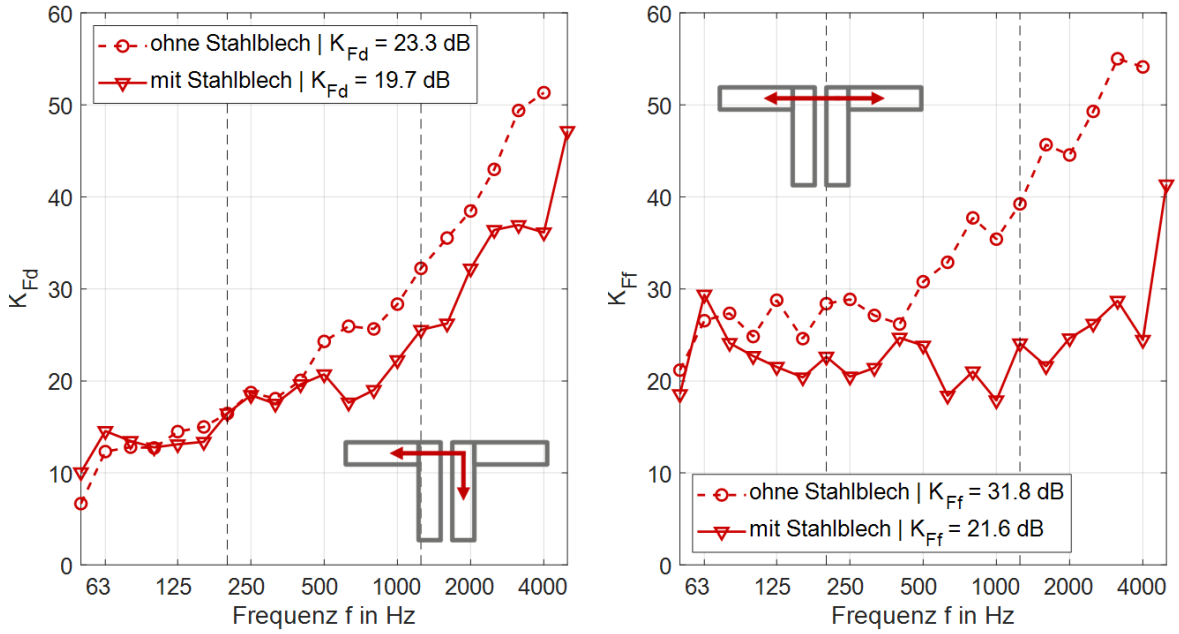


Abbildung 14: Horizontale Kopplung der Module mittels 5 mm Stahllaschen, Überbrückung der durchgehenden Fuge zwischen den Raummodulen

B) Dorn – Entkoppelte Gewindestange

Bei Hersteller 2 liegen für die vertikale Kopplung der Raummodule zwei zu unterscheidende Situation vor. Im Schnitt (s. Abbildung 16) links zu sehen, ist die Verbindung mittels Stahldorn. Zur Lagesicherung sind im oberen und unteren Modul Bohrungen vorgesehen. Auf der rechten Modulseite werden die Module durch Gewindestangen entkoppelt verschraubt (lila Pad). Als Trenndecke lag hier die Decke B (CLT-CLT) vor, die Entkopplung erfolgte durch ein PU-Elastomerlager.

Messungen auf beiden Modulseiten zeigen vor allem auf dem Übertragungsweg Ff um ca. 6 dB bessere Werte auf der Seite der Gewindestange, was auf eine Überbrückung der Baulager durch den Winkel/Dorn zurückzuführen ist. Für den Fall, dass die Flankenübertragung nicht dominierend ist, sind die immer noch sehr hohen Werte des K_{ij} unproblematisch. Dennoch besteht an dieser Stelle die Möglichkeit zu einer besseren Entkopplung der Dorne.



Abbildung 15: Vertikale Kopplung der Raummodule bei Hersteller 2,
links: Positionierung durch am Nachbarmodul verschraubten Stahldorn,
rechts: Verschraubung mittels entkoppelter Gewindestange

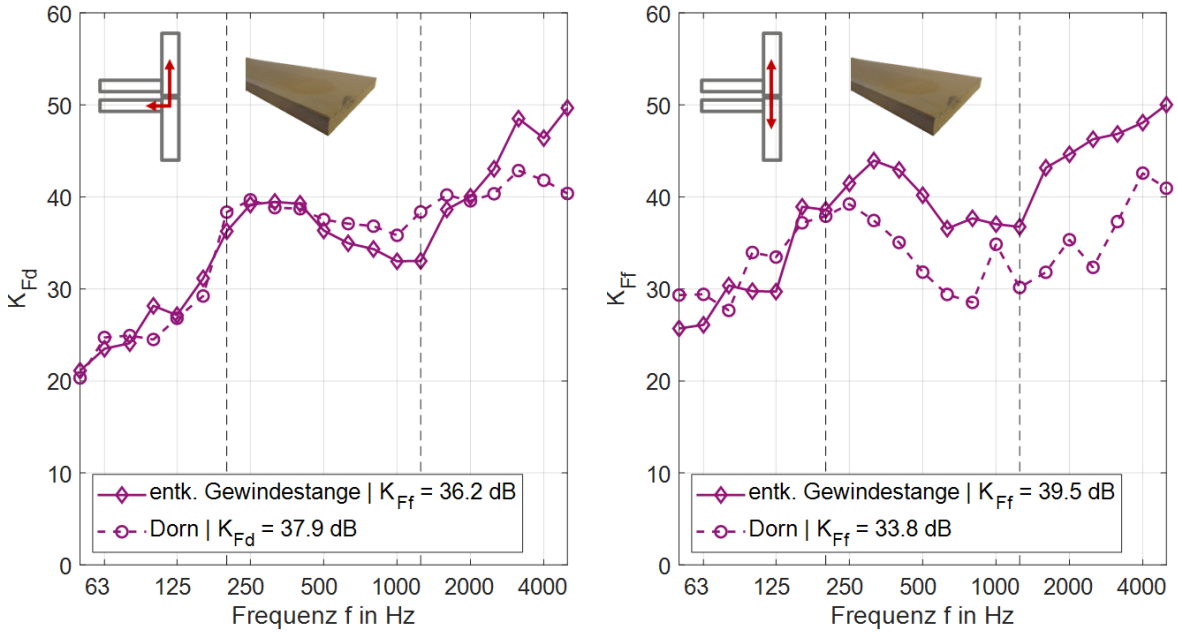


Abbildung 16: Gegenüberstellung der K_{ij} auf der linken (Dorn) und rechten (Gewindestange) Modulseite auf den Pfaden Ff und Fd

3.3. Einfluss der Baulager

Bei Hersteller 2 wurden verschiedene Entkopplungsmaterialien zwischen den Raummodulen eingebracht und die entsprechenden K_{ij} gemessen. Als Trenndecke der Module lag hierfür die Decke B vor. Die von den jeweiligen Herstellern ausgelegten PU-Elastomerlager (d = 12,5 mm) zeigen eine vergleichbare Wirksamkeit mit sehr hohen Werten um ca. 40 dB (Weg Ff) und 37 dB (Weg Fd).

Weil die Baulager meist nicht auf die gesamte Modullänge eingebaut werden, sind OSB-Streifen in gleicher Länge und Dicke für die Messung ohne Entkopplungsmaterial verwendet worden. Kostengünstige Gummigranulat-Streifen konnten verglichen mit den PU-Elastomeren nicht überzeugen, der Einzahlwert des K_{ij} liegt nur geringfügig über der OSB-Variante. Die Streifen aus mit Quarzsand gefüllten Pappwaben führten zu nahezu identischen Einzahlwerten und Verläufen wie die gekoppelte OSB-Variante (s. Abbildung 19). Insgesamt betrachtet liegen schon die Werte ohne Entkopplungsmaterialien mit 31,6 dB (Weg Ff) und 33,3 dB (Weg Fd) auf einem sehr hohen Niveau, mit korrekt ausgelegten Baulagern lassen sich Verbesserungen in der Größenordnung von 10 dB (Weg Ff) und 4 dB (Weg Fd) erzielen (vgl. Abbildung 18 & Abbildung 20).

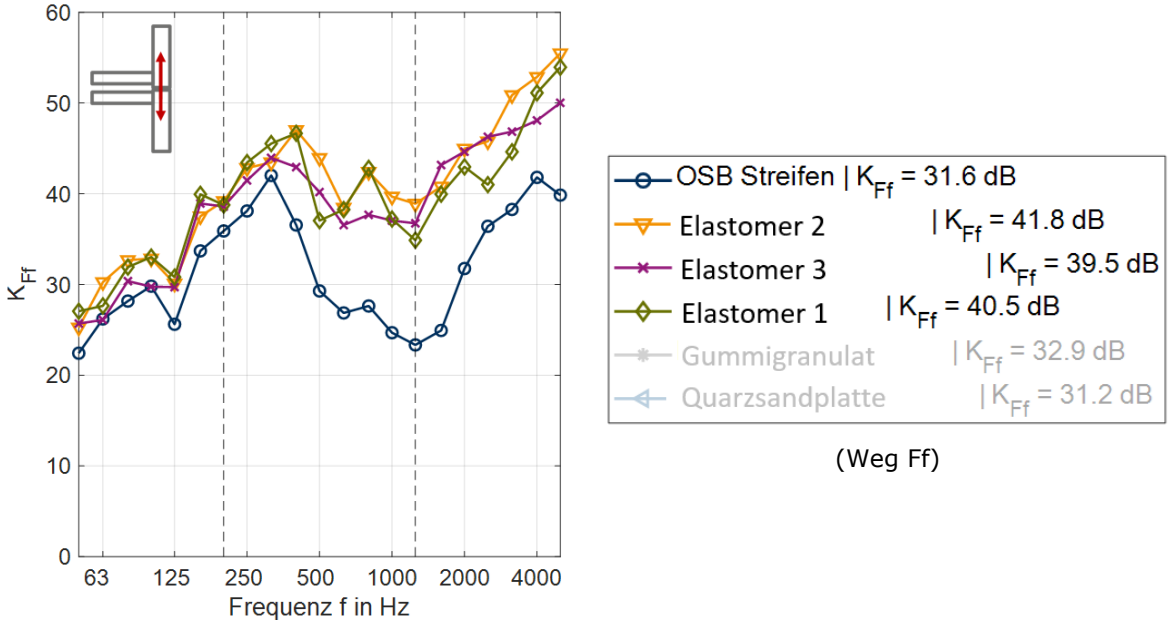


Abbildung 17: Vergleich von nicht entkoppelten (OSB-Streifen für identische Kopplungslänge) und entkoppelten Raummodulen (Elastomer 1-3) auf dem Weg Ff

Dieser Unterschied liegt in der eingesetzten Modulwand des Herstellers begründet. Dabei handelt es sich um eine Massivholz-Ständerwand, deren Aussteifung mittels der aufgeklammerten Gipsfaserbekleidung erfolgt. Diese Wand weist durch die vielen senkrechten Fugen zwischen den Stehern eine hohe innere Dämpfung auf, was wiederum höhere K_{ij}-Werte auf dem vertikalen Übertragungsweg Ff zur Folge hat.

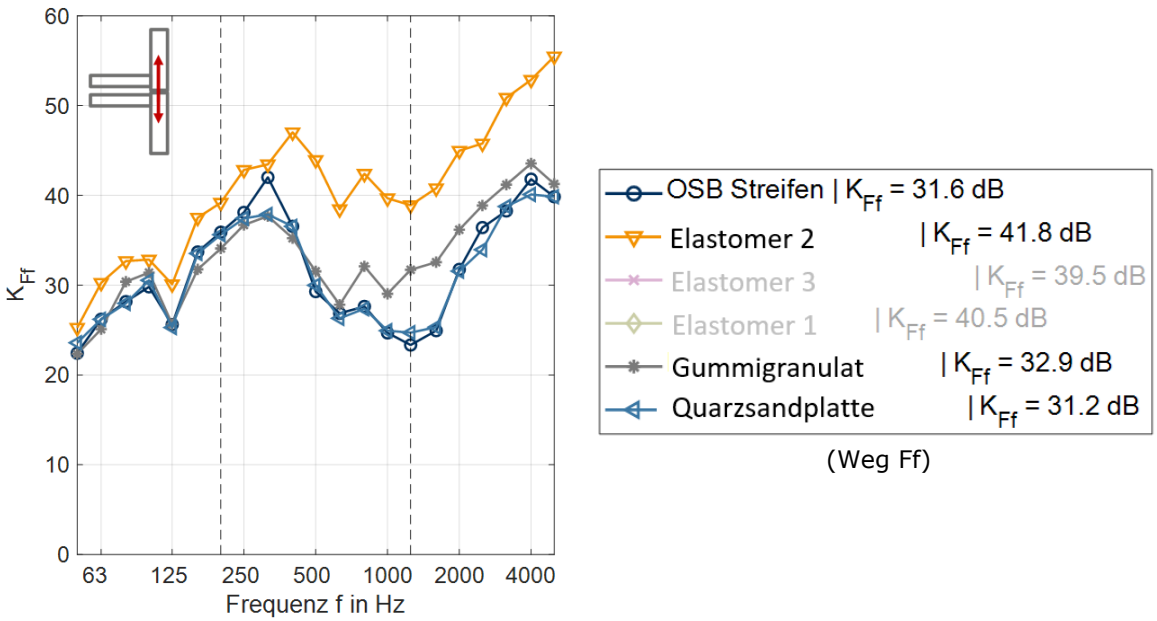


Abbildung 18: Gegenüberstellung von nicht entkoppelten und entkoppelten Raummodulen auf dem Weg Ff; zusätzlich: schwach wirksame Gummigranulat-Matte und unwirksame Quarzsand-Streifen

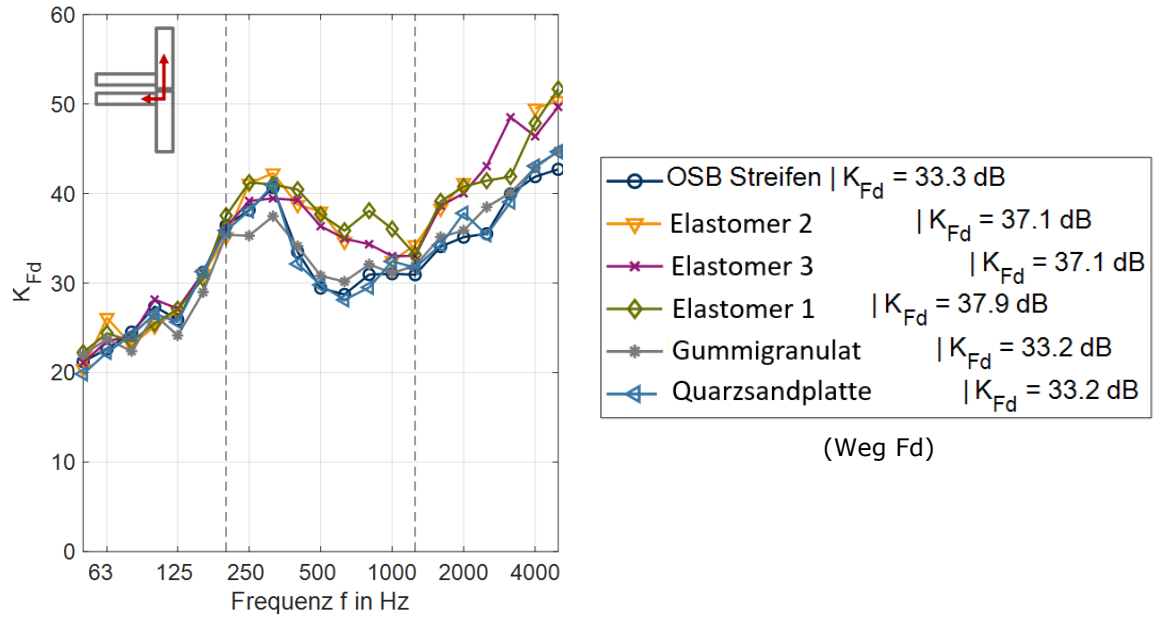


Abbildung 19: Gegenüberstellung aller gemessenen Stoßsituationen auf dem Weg Fd

4. Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die planerische Unterstützung durch die Arbeitsgruppe, die Bereitstellung der Mockups sowie der Entkopplungsmaterialien durch die Hersteller und für die finanzielle Unterstützung durch das BBSR. Das Forschungsprojekt wird mit Mitteln der Zukunft Bau Forschungsförderung des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung gefördert (Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-22.29). Außerdem gilt der Dank *Müller BBM* für die Unterstützung hinsichtlich der eingesetzten Messtechnik.

5. Literatur

[1] Rabold, A., Bacher, S., Grießhammer, S., Pfattheicher, S., Mooser B., Schall-schutz von Gebäuden in Holz-modulbauweise – Ermittlung von Planungsdaten für einen Bauteilkatalog zur Integration in DIN 4109, Kooperationsforschungsvorhaben der TH Rosenheim und des ift Rosenheim, in Bearbeitung

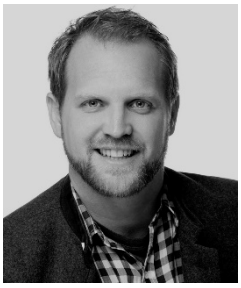
[2] DIN EN ISO 10848-1: 2018-02, Messung der Flankenübertragung von Luftschall, Trittschall und Schall von gebäudetechnischen Anlagen zwischen benachbarten Räumen im Prüfstand und am Bau

[3] DIN EN 12354-2: 2017-11, Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen

[4] Masterarbeit Camille Châteauvieux-Hellwig, 2016: Einfluss der Dämpfung in Massivholzbauteilen auf das Stoßstellendämm-Maß

Aufzugschächte in Holzbauweise – Konstruktionsprinzipien und Prognose-möglichkeiten für den Schallschutz

Adrian Blödt
IB Blödt / Blödt Holzkomplettbau GmbH
Kohlberg, Deutschland



Christoph Höller
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Regensburg, Deutschland



1. Aufzugschächte in Holz – Aktueller Stand

Die Holzbauweise erfreut sich zunehmender Beliebtheit, sowohl aufgrund ihres hohen CO_2-Speicherpotenzials als auch aufgrund ihrer Nachhaltigkeit als nachwachsender Rohstoff. Der Anteil von Holzkonstruktionen am Neubau variiert je nach Gebäudetyp und -klasse zwischen 6% und 30% [1]. Während der Holzbau im Bereich von Ein- und Zweifamilienhäusern bereits etabliert ist, beträgt sein Marktanteil im Mehrfamilienwohnhaussektor derzeit lediglich 6% [1]. Dennoch verzeichnet gerade dieser Bereich die höchsten Wachstumsraten und wird als äußerst vielversprechend angesehen.

Besonders beim Bau von Mehrfamilienhäusern mit mehr als drei Stockwerken sind Aufzugsanlagen unerlässlich. Traditionell werden Aufzüge in massiven, mineralischen Schächten installiert. Aus bauakustischer Sicht ist hierbei insbesondere DIN 8989 [2] zu berücksichtigen. In der Praxis wird oft davon ausgegangen, dass nur auf diese Weise die bauakustischen Anforderungen erfüllt werden können. Obwohl DIN 8989 [2] grundsätzlich die Verwendung von Vorsatzschalen vor Schächten ermöglicht, gilt dies nur für die genannten Massivschächte.

Angesichts der äußerst günstigen Montagebedingungen für Aufzugtechnik in Holzschächten (Abbildung 1 / links) und der zügigen Montage der Schächte selbst (Abbildung 1 / rechts) ist die Nachfrage und der Wunsch nach Holzschächten stark gestiegen.

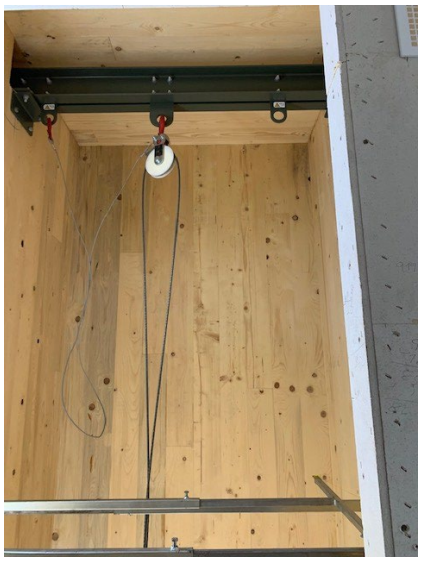




Abbildung 1: links: Blick in den Schacht bei der Montage der Aufzugtechnik Quelle: Holzbau Semmler / rechts: Hubbereiter Aufzugschacht Quelle: Holzunion

Schächte in Holzbauweise werden werkseitig hergestellt und als komplette «Schachteinheit» in das Gebäude eingehoben. Während der Vorfertigung können bereits erforderliche bauakustische und brandschutztechnische Bekleidungen unter kontrollierten Bedingungen aufgebracht werden, siehe Abbildung 2.
Es wurden bereits Gebäude mit Holzschächten ausgestattet und im Hinblick auf ihre bauakustische Eignung untersucht. Dabei sind nicht nur Messungen zur Einhaltung der normativen Anforderungen durchgeführt worden, sondern auch weitere bauakustische Eigenschaften wie beispielsweise die eingeleitete Körperschallleistung und der Norm-Geräteschallpegel wurden ermittelt.

Dieser Artikel soll einen Überblick über die gewonnenen Messergebnisse geben. Darüber hinaus sollen Empfehlungen für die Ausführung dargestellt werden und Prognosemöglichkeiten diskutiert werden. Es werden spezifische Empfehlungen für Schachtkonstruktionen in Holzbauweise vorgestellt, welche die aktuellen Anforderungswerte gemäß DIN 4109-1:2018 [3] erreichen und sich in der Praxis bewährt haben. Zudem wird auf die für den Schallschutz wesentlichen Einflussfaktoren der Aufzugtechnik eingegangen.

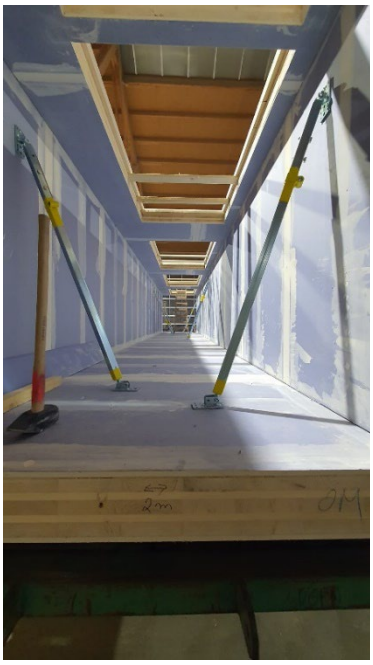


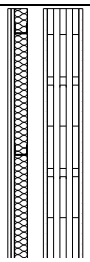
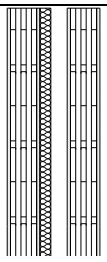
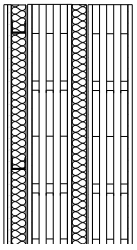
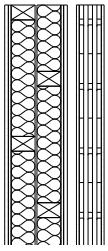


Abbildung 2: Vorfertigung des Schachtes in der Werkhalle Quelle: Holzbau Semmler

2. Konstruktionsprinzipien und Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden die untersuchten Schachttypen in Holzbauweise sowie die entsprechenden Messergebnisse vorgestellt. Dabei liegt der Fokus darauf, die Schächte in Kategorien gemäß Tabelle 1 einzuteilen. Eine detaillierte Vorstellung der Ergebnisse für jeden einzelnen Schacht erweist sich als nicht zielführend, da unterschiedliche Aufzugtechniken in den Schächten verbaut sein können. Vielmehr soll die grundsätzliche Eignung der verschiedenen Schachttypen verdeutlicht werden. Es ist wichtig zu betonen, dass die verbaute Aufzugtechnik einen wesentlich größeren Einfluss auf die Geräuschentwicklung haben kann als der Schacht selbst oder seine Bauweise, siehe auch [4].
Die Messungen wurden stets in einem Raum unmittelbar hinter dem Schacht durchgeführt, was als der bauakustisch kritischste Fall betrachtet wird. Für Konstellationen mit einem Pufferraum dazwischen oder bei Schächten im Treppenauge eines Treppenhauses ist für diese Bauweisen von einer akustisch deutlich günstigeren Situation auszugehen.

Tabelle 1: Kategorien der untersuchten Schachttypen

Massivholzschacht mit biegeweicher Vorsatzschale	2-schaliger Massivholzschacht	Sonderkonstruktionen
		 

Zusätzlich zu den Einzahlwerten $L_{AF,max,n}$ und $L_{AF,max,nT}$ wurden bei jeder Messung die entsprechenden Spektren des Geräusches analysiert. Dies ermöglicht eine genauere Einordnung der Eignung verschiedener Schächte anhand des Verlaufs des Schalldämm-Maßes und die gezielte Definition von Verbesserungsmaßnahmen.

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich der Spektren eines Stahlbetonschachtes in einem Massivgebäude mit denen eines Holzschachtes in einem Gebäude in Holztafelbauweise mit Massivholzdecke.

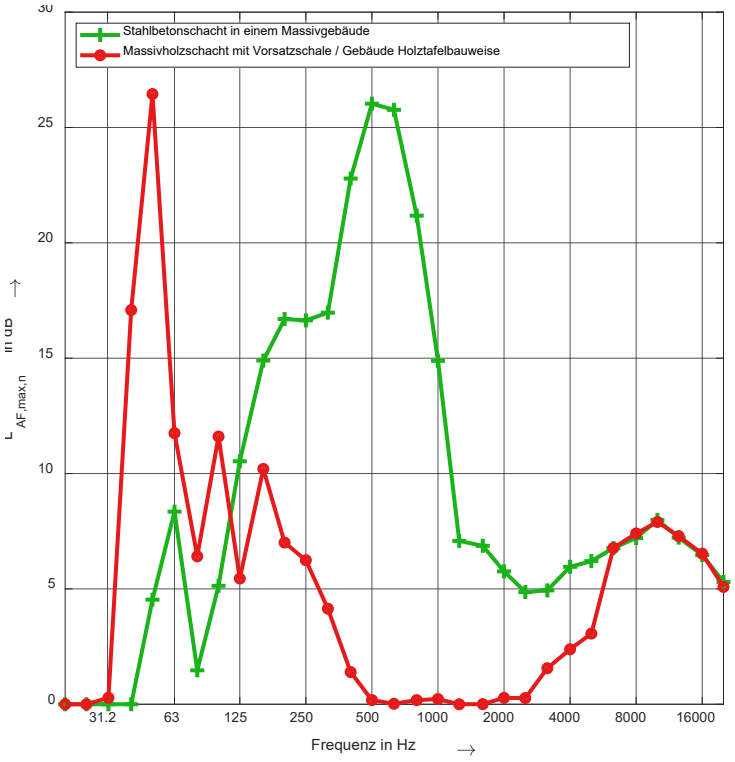


Abbildung 3: Beispielhaftes Spektrum eines Stahlbetonschachtes (grün) im Vergleich zu einem Holzschacht (rot)

Auffällig ist, dass sich die Übertragungsmaxima in der (spektralen) Lage unterscheiden, jedoch nicht im Betrag. Für Holzschächte deutet es darauf hin, dass eine Optimierung bei niedrigen Frequenzen (unter 50-80 Hz) erforderlich ist. Die Einzahlwerte für $L_{AF,max,n}$ betragen bei beiden Messungen etwa 28 dB. Dies verdeutlicht, dass es nicht ausschließlich auf die Bauweise ankommt, sondern vielmehr auf die richtige Aufzugstechnik und die Abstimmung mit den Bauteilen. Im Verlauf der Untersuchungen zeigte sich, dass für die immer zweischaligen Holzschächte eine möglichst tiefe Abstimmung hinsichtlich der Resonanzfrequenz erforderlich ist.
Bei sämtlichen Messungen wurden sowohl $L_{AF,max,n}$ als auch $L_{AF,max,nT}$ ausgewertet. In diesem Artikel werden ausschließlich die Werte dargestellt, die auf die Norm-Absorptionsfläche bezogen sind, da dies derzeit den Anforderungswert definiert. Die Autoren betrachten jedoch die Verwendung von nachhallzeitbezogenen Kenngrößen für die Bewertung von Geräuschen der technischen Gebäudeausrüstung als vorteilhafter. Bei der Angabe der Einzahlwerte handelt es sich um die Berechnung nach DIN 10052 [5] mit einer gemittelten Nachhallzeit. Eine terzbandweise Korrektur für die Nachhallzeit wurde alternativ ebenfalls durchgeführt, wird aber hier nicht dargestellt.
Bei der nachfolgenden Vorstellung der unterschiedlichen Schachttypen bleiben Einflüsse aus der Antriebs- oder Aufzugtechnik außer Acht. Diese sind in der Regel unabhängig von der Bauweise und können eine Pegelerhöhung von bis zu 10 dB verursachen. In Abschnitt 2.4 wird der Einfluss der Aufzugtechnik nochmals diskutiert.

2.1. Schächte mit Vorsatzschalen

Die erste untersuchte Kategorie von Schächten umfasst Massivholzschächte, die innenseitig mit brandschutzwirksamer Bekleidung versehen waren und eine zum Raum hin orientierte, zweilagige mit Gipsplatten beplankte Vorsatzschale aufwiesen. Sowohl Holzständerwerke als auch Metallständerwerke wurden für den Aufbau der Vorsatzschale verwendet. Der grundlegende Aufbau ist in Tabelle 1 (links) dargestellt.

Bei den Messungen hat sich gezeigt, dass diese Bauweise gut für die Anwendung als Aufzugschacht geeignet ist. Dabei ist jedoch der lichte Abstand der Vorsatzschale entscheidend. Lediglich bei einer besonders günstigen Antriebstechnik des Aufzugs sind

Vorsatzschalen mit einem lichten Abstand von 80 mm anwendbar (75 mm CW-Profil + 5 mm Luft). Bei einem lichten Mindestabstand von 80 mm zwischen der Vorderkante des Massivholzschachts und der rückseitigen Ebene der Gipsbeplankung wurden Werte um und über dem für den Wohnbau geforderten Pegel von $L_{AF,max,n} \leq 30$ dB gemessen.

Abbildung 4 zeigt die Zusammenstellung der Messdaten für die Kategorie Massivholzschächte mit freistehender Vorsatzschale. Der Median der Datensammlung über der Frequenz ist rot dargestellt. Der Median der Einzahlwerte für $L_{AF,max,n}$ liegt bei etwa 30 dB. Dabei ordnen sich Schächte mit lichten Abständen der Vorsatzschale größer als 100 mm unter diesem Wert ein, während Schächte mit lichten Abständen um 80 mm eher oberhalb des Medians liegen.

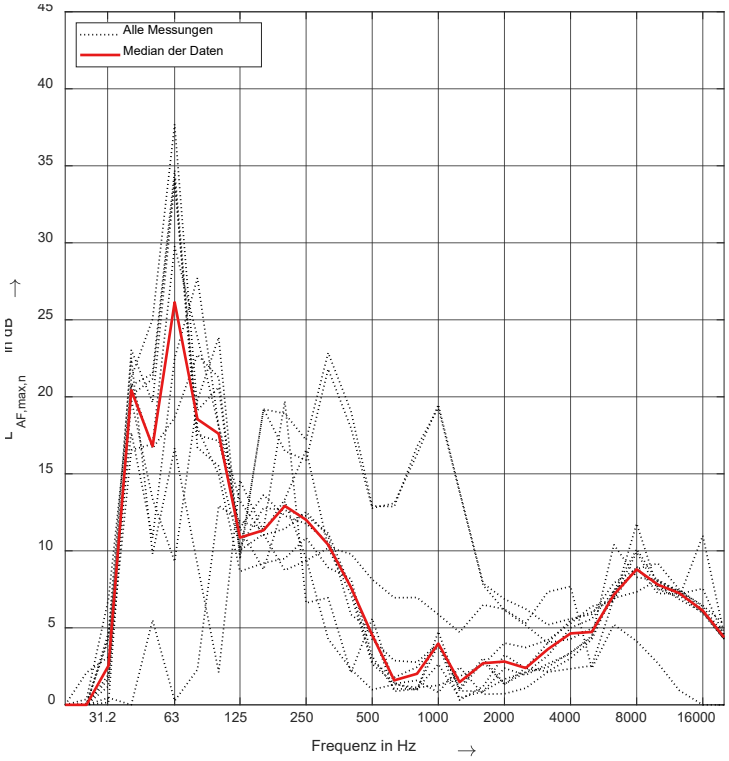


Abbildung 4: Spektren der Fahrgeräusche für Massivholzschächte mit freistehender Vorsatzschale / schwarz gepunktet: Einzelmessungen / rot durchgezogen: Median der Messung für den Schachttyp $L_{AF,max,n} \approx 30$ dB

Die Messdaten für die erste Schachtkategorie mit freistehender Vorsatzschale zeigen, dass der Mindestwert für $L_{AF,max,n}$ eingehalten werden kann, jedoch kein hoher Sicherheitsabstand vorliegt. Es empfiehlt sich daher, Schachtkonstruktionen zu verwenden, die mit größeren lichten Schalenabständen versehen sind, wie es üblicherweise im Wohnbau mit 80 mm der Fall ist. Eine gut geeignete Konstruktion wird in Abschnitt 3.1 dargestellt.

2.2. Schächte aus Massivholzkonstruktionen

Die zweite Schachtkategorie besteht ebenfalls aus einer zweischaligen Konstruktionsweise. Hierbei sind jedoch zwei Massivholzwände mit Abstand hintereinander angeordnet. Zusätzlich werden aus Brandschutzgründen weitere Gipslagen auf den Schachtwänden angebracht. Tabelle 1 (Mitte) veranschaulicht den Aufbau dieser untersuchten Schachtkategorie.

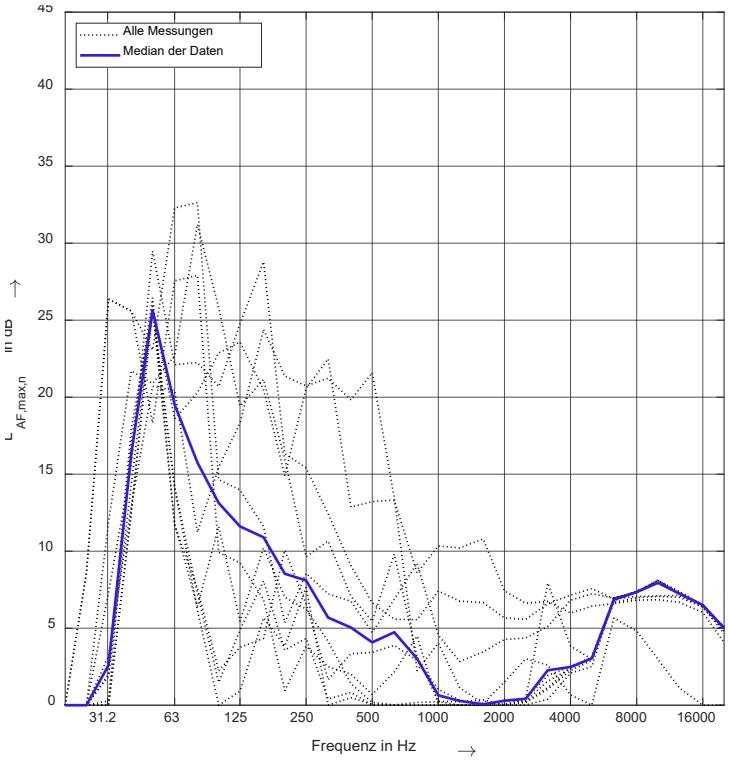


Abbildung 5: Spektren der Fahrgeräusche für 2-schalige Massivholzschächte / schwarz gepunktet: Einzelmessungen / blau durchgezogen: Median der Messung für den Schachttyp $L_{AF,max,n} \approx 33$ dB

Die untersuchten Schächte weisen zwischen den einzelnen Schalen einen Abstand von etwa 60 mm auf, der zu etwa 90% mit fasrigem Dämmstoff gefüllt ist. Abbildung 5 zeigt auch hier die Spektren der Fahrgeräusche des Aufzugs in diesem Schachttyp. Die Messwerte für den Einzahlwert $L_{AF,max,n}$ lagen in fast allen Fällen über 30 dB, was bedeutet, dass sie nur für Gebäude mit Büronutzung ($L_{AF,max,n} \leq 35$ dB) geeignet wären. Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass trotz der höheren Masse im Vergleich zur ersten Schachtkategorie der Abstand zwischen den beiden Schalen zu gering ist, wodurch die Resonanzfrequenz der Wand zu hoch liegt. Diese Bauweise ist daher im Hinblick auf die Verwendung als Aufzugschacht äußerst kritisch zu bewerten, da die Grenzwerte für den Wohnbau nur durch eine insgesamt größere Bauteildicke erreicht werden können. In Abschnitt 3.2 werden hierzu Hinweise gegeben.

2.3. Sonderkonstruktionen

Als dritte Schachtkategorie wurden in der Messserie Schächte betrachtet, die nicht eindeutig den vorherigen Schachtkategorien zugeordnet werden konnten. Dazu zählten unter anderem Stahlbetonschächte in Holzgebäuden, zweischalige Massivholzschächte mit zusätzlich freistehender Vorsatzschale und Schächte mit einer davor liegenden Wohnungstrennwand (siehe Tabelle 1 (rechts)).

Allen diesen Schächten ist gemeinsam, dass sie den Grenzwert von $L_{AF,max,n} = 30$ dB deutlich unterschreiten. Es soll jedoch auf eine ausführliche Beschreibung dieser Schachttypen verzichtet werden, da einige von ihnen aus wirtschaftlichen Gründen nicht umsetzbar erscheinen.
In Abbildung 6 sind die Spektren der Fahrgeräusche für die Sonderkonstruktionen über der Frequenz dargestellt. Dabei zeigten sich Werte für $L_{AF,max,n}$ von etwa 25-27 dB. Diese Konstruktionen sind problemlos für den Wohnbau anwendbar.

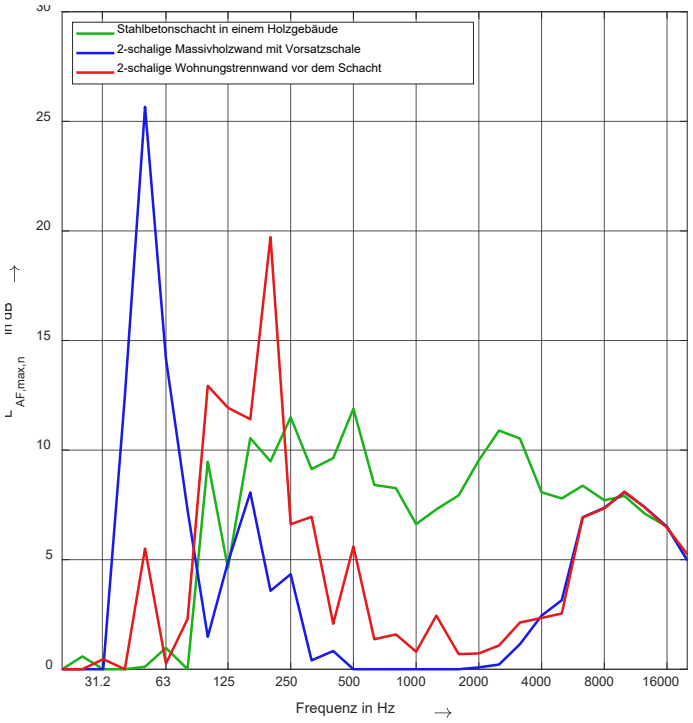


Abbildung 6: Spektren der Fahrgeräusche für «Sonderschachtkonstruktionen» / Stahlbetonschacht freistehend und mit Vorsatzschale

2.4. Aufzugtechnik: Besonderheiten und Fehlerquellen

In der Messserie wurden ausschließlich Aufzüge mit Seilantrieb betrachtet. Bei allen Schachtkategorien konnten Geräusche identifiziert werden, die mit bestimmten Betriebsmodi der Aufzugtechnik und möglichen Fehlstellungen in Verbindung stehen.

Impulshaltige Geräusche

Sehr eindrucksvoll zeigen sich «Schläge» bzw. Anschlaggeräusche im Spektrum der Geräusche. Abbildung 7 veranschaulicht das Spektrum beim Anschlag oder bei einem Schlag im Aufzugschacht für Holz- und Stahlbetonschächte. Bei allen Schachttypen, sowohl Massiv- als auch Holzschächte, treten Pegelerhöhungen ab ca. 500 Hz von über 10 dB im Vergleich zum Grenzwert von $L_{AF,max,n}$ = 30 dB auf. Dies bedeutet, dass weder die bauliche Konstruktion in Holz- noch in Massivbauweise Abhilfe gegenüber impulsartigen Anregungen schaffen kann. Die Gründe für diese «Schläge» waren vielfältig und nicht immer eindeutig identifizierbar. Jedoch war der «Schlag» bei allen Messungen reproduzierbar. In einem Fall konnte das «Aufsetzen» der Kabine auf einem Puffer im Untergeschoss während der Fahrt zur Ruhestellung als Quelle identifiziert werden. Ein anderes Mal konnten Unebenheiten an einem Schienenstoß ausgemacht werden.

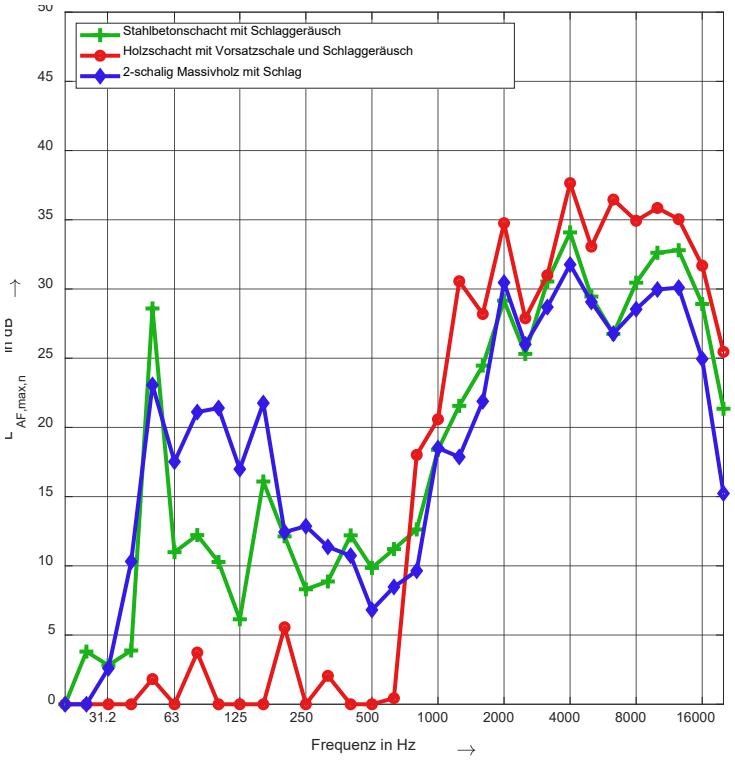


Abbildung 7: Spektren an verschiedenen Schachttypen beim Vorliegen von impulshaltigen Geräuschen durch die Aufzugtechnik

Fahrtrichtung

Die Richtung der Fahrbewegung spielt ebenfalls eine Rolle bei der Bewertung der Geräusche. Während der Fahrt mit der Kabine abwärts zeigten sich in einem Messbeispiel Geräusche, die bis zu 2-3 dB lauter waren als während der Aufwärtsfahrt. Im Einzahlwert waren 3 dB Pegelerhöhung festzustellen ($L_{AF,max,n,auf}$ = 32 dB → $L_{AF,max,n,ab}$ = 35 dB). Dies erscheint zunächst paradox, da man bei einer Abwärtsfahrt normalerweise eine geringere erforderliche Antriebsleistung erwarten würde. Bei genauerer Betrachtung der Technik dieses Aufzugs wird jedoch deutlich, dass hier das Gegenteil der Fall ist.

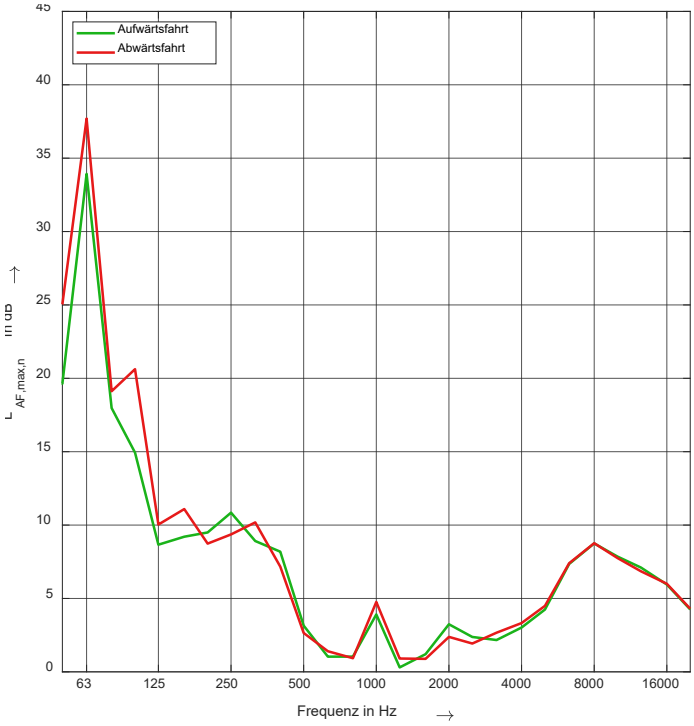


Abbildung 8: Unterschied zwischen Auf- und Abwärtsfahrt in einem Massivholzschacht

Bei der Abwärtsfahrt muss der Antrieb des Aufzugs das Gegengewicht der Kabine nach oben befördern. Bei der Aufwärtsfahrt hingegen bewegt sich das Gegengewicht der Kabine bei verminderter Antriebsleistung nach unten. Dies erklärt den Unterschied, der in Abbildung 11 zu erkennen ist.

Schienenqualität und Oberflächenrauigkeit

Bei der Untersuchung eines Schachtes fiel auf, dass nach der sicherheitstechnischen Überprüfung und Inbetriebnahme 3 dB höhere Werte festgestellt wurden als bei einer vorangegangenen Messung. Zwischen den beiden Messungen fand das Inbetriebnahme-Prozedere statt, bei dem der Aufzug unter anderem in den freien Fall gebracht wird, um zu überprüfen, ob die Fangeinrichtung der Kabine vorschriftsgemäß funktioniert. Bei diesem «Sicherheitsfang» wird die Kabine durch eine mechanische Vorrichtung an den Laufschienen des Aufzugs «verkeilt», wodurch kleine Kerben, die sogenannten Fangstöße, an den Schienen entstehen.

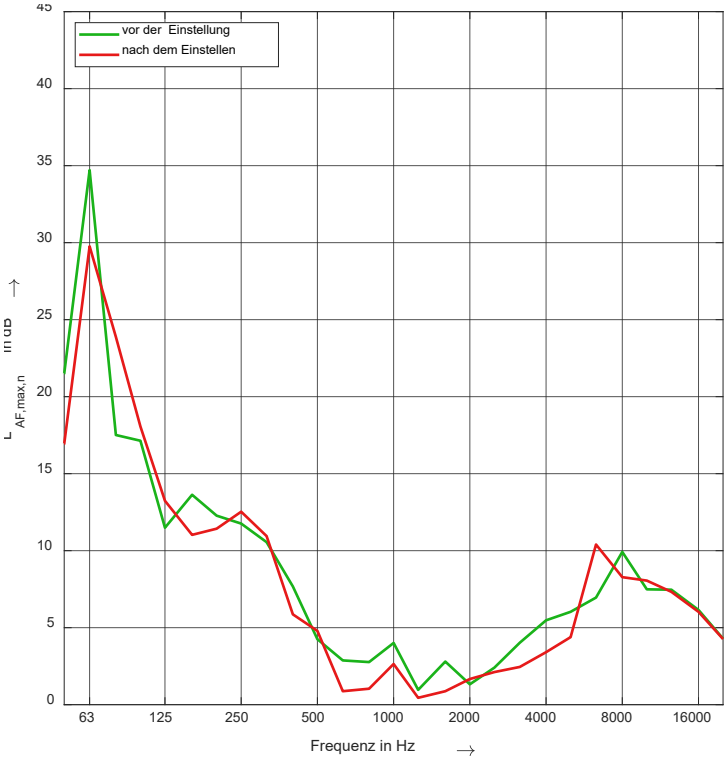


Abbildung 9: Einfluss des sog. «Fangstoßes» auf das Geräuschspektrum

Diese Fangstöße erhöhen die Oberflächenrauigkeit der Schienen und führen zu dem gemessenen höheren Pegel, wie er im Spektrum für das Fahrgeräusch (vorher/nachher) in Abbildung 13 dargestellt ist. Der Unterschied zwischen «vor der Einstellung» und «nach der Einstellung» besteht darin, dass die Fangstöße auspoliert wurden und das gesamte Schienensystem nochmals geglättet wurde. Der Effekt der «Einstellung» führte zu einem um 3 dB geringeren Pegel. Eine 3 dB-Verringerung ist auch durch die in den Abschnitten 2.1 und 2.2 geforderte Erhöhung der lichten Abstände zu erwarten.

Zusätzlich zu den dargestellten Effekten an der Aufzugtechnik wurden weitere Effekte festgestellt, auf die in diesem Rahmen nicht näher eingegangen werden soll.

3. Ausführungsmöglichkeiten, Detailausbildung und Prognosemöglichkeiten

Die Prognose der Geräusche, die durch die Fahrbewegung eines Aufzugs in Gebäuden entstehen, gestaltet sich als schwierig. Eine verlässliche Prognose scheint nur dann möglich zu sein, wenn die Aufzugstechnik gut eingestellt ist und keine «außerplanmäßigen» Geräusche wie Schläge etc. auftreten. Diese können teilweise ein völlig anderes Geräuschspektrum verursachen und sind daher nicht prognostizierbar. Im Rahmen der Messserie wurden und werden nach wie vor Übertragungsfunktionen zur Ermittlung des Norm-Geräteschallpegels nach DIN 12354-5 und DIN 10848 erhoben. Erste Ergebnisse wurden in [6] vorgestellt. Allerdings muss dafür auch die in die Konstruktion eingeleitete Körperschallleistung durch einen Aufzug bekannt sein. Die Messung der Körperschallleistung gestaltet sich für derartig große Anlagen schwierig und kann im Prinzip nur indirekt erfolgen. Ein «klassisches» Prognoseverfahren liegt daher nicht vor. Derzeit kann die Eignung der Schächte nur durch Konstruktionsempfehlungen und auf Basis gemessener Objekte beurteilt werden. Diese Herausforderung ist jedoch für den Massivbau in gleicher Weise zu bewältigen, mit dem Unterschied, dass durch DIN 8989 [2] dieses «Erfahrungswissen» genormt wurde.

Für die Abschätzung, ob eine Schachtkonstruktion anwendbar ist, wurde im Rahmen der Untersuchungen der Versuch unternommen, auf Basis der Messdaten den Schallpegel eines Massivholzschachtes ohne weitere Vorsatzkonstruktion rechnerisch zu bestimmen. Dabei wurde von den Messwerten des Schachtes am Bau mit Vorsatzschale die Verbesserung durch eine Vorsatzschale gleicher Bauart vor einer Massivholzwand aus dem Labor subtrahiert. Anschließend wurde dem so entstandenen Fahrgeräuschspektrum des «Rohschachtes» die Verbesserung einer Vorsatzschale im Labor mit größerem lichtem Abstand (hier 105 mm) wieder angerechnet. Dadurch konnte der Pegel für einen Schacht mit einer Vorsatzschale und größerem lichten Abstand ermittelt werden. Bei den Messungen an weiteren Objekten mit größeren Schalenabständen zeigte sich eine gute Übereinstimmung mit den Prognosewerten.

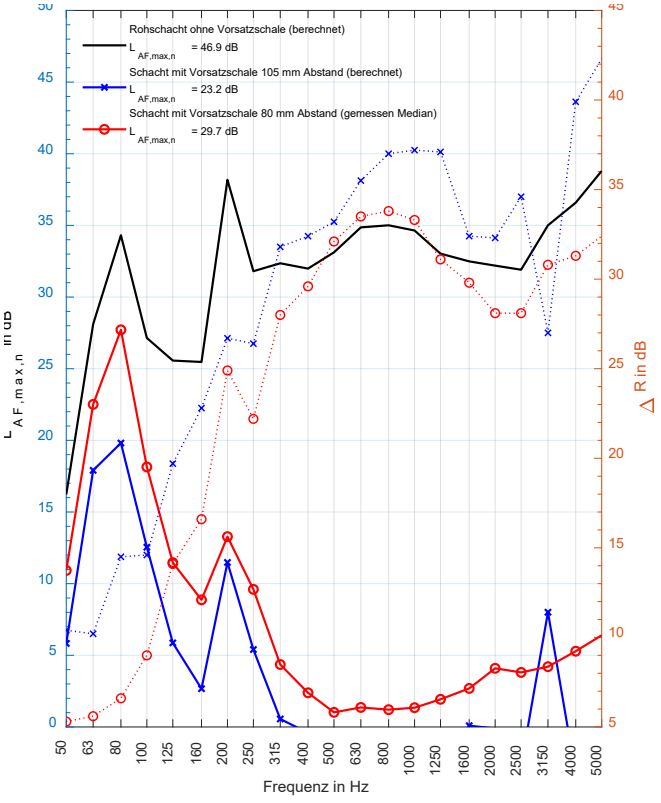


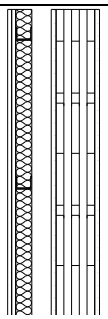
Abbildung 10: Prognosemöglichkeit unter Berücksichtigung verschiedener Vorsatzschalenabstände

In Abbildung 10 ist die «Rückrechnung» des Spektrums dargestellt. Allerdings ist es nur schwer vorstellbar, dass sich mit dieser Methode weitere Schachtkonstruktionstypen bewerten lassen. In Abbildung 10 ist auf der linken Ordinate der Pegel, welcher durch einen technischen Ausrüstungsgegenstand verursacht wird, hier einem Aufzug, aufgetragen. Auf der rechten Ordinate ist das Verbesserungsmaß einer Vorsatzschale (strichlierte Linien blau: 105 mm / rot: 80 mm Abstand) vor einer Massivholzwand aufgetragen. Diese Daten dienen dann erst der «Rückrechnung» und der anschließenden «Hinzurechnung».

3.1. Schächte mit Vorsatzschalen

Basierend auf den vorgestellten Messungen und der zu Beginn dieses Abschnitts vorgestellten Prognose kann für Massivholzschächte mit freistehender Vorsatzschale ein Aufbauvorschlag gemäß Tabelle 2 unterbreitet werden.

Tabelle 2: Vorschlag für einen Schachtaufbau mit biegeweicher Vorsatzschale zur Einhaltung von $L_{AF,max,n/nT} \leq 30$ dB

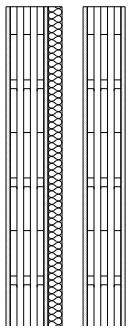
	mm	Bauteilschichten
	18	GF oder GKF Platte
	140	Brettsperr- oder Brettstapelholz
	18	GF oder GKF Platte
	≥25	Luftschicht
	≥75	Metallständerprofile mit Dämmstofffüllung d ≥ 60 mm
	15	GF oder GKF Platte
	15	GF oder GKF Platte

Wesentlich dabei ist, dass der lichte Abstand der Vorsatzschale zur Grundwand des Schachtes mehr als 100 mm beträgt. Unter Beachtung der Empfehlung im Abschnitt 3.3 ist dann zu erwarten, dass $L_{AF,max,n} = 30$ dB für ein Raumvolumen bis etwa 62 m³ unterschritten wird.

3.2. 2-schalige Massivholzschächte

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben ist auch für die 2-schaligen Massivholzschächte eine Aufbauempfehlung möglich. Diese befindet sich in Tabelle 3.

Tabelle 3: Vorschlag für einen Schachtaufbau in 2-schaliger Massivholzbauweise zur Einhaltung von $L_{AF,max,n/nT} \leq 30$ dB

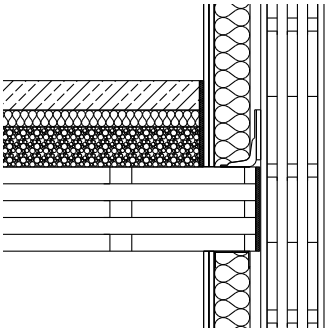
	mm	Bauteilschichten
	18	GF oder GKF Platte
	140	Brettsperr- oder Brettstapelholz
	18	GF oder GKF Platte
	≥100	Luftschicht mit Dämmstofffüllung d ≥ 60 mm (Dämmstoff)
	18	GF oder GKF Platte
	140	Brettsperr- oder Brettstapelholz
	18	GF oder GKF Platte

2-schalige Massivholzschächte zeigen tendenziell ungünstigere Werte und sollten vorrangig in Gebäuden mit Büronutzung angewandt werden oder nicht unmittelbar an schutzbedürftige Räume angrenzen.

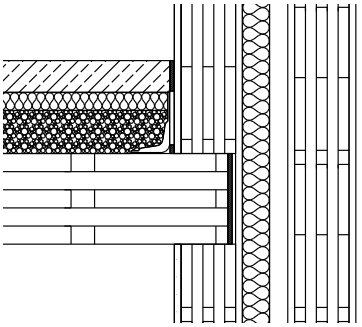
3.3. Empfehlung für Detailausführung und Aufzugtechnik

Neben den eigentlichen Schachtkonstruktionen ist auch der Anschluss des Schachtes an das Gebäude von Bedeutung. Es ist in allen Fällen von einer starren Verbindung des Schachtes mit dem Baukörper abzuraten. Sollten jedoch Verbindungen zum Baukörper

notwendig sein, um horizontale Lasten aus dem Schacht abzutragen, so sollten diese ausschließlich mit elastischen Zwischenschichten ausgeführt werden. Eine Ausnahme bildet das in der Regel in Massivbauweise errichtete Gründungsbauteil. Hier muss und kann der Aufzugschacht starr verbunden werden, um die Stabilität des Schachtes sicherzustellen. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen beispielhafte Anschlusssituationen, wie sie bei den Messobjekten vorgefunden wurden.

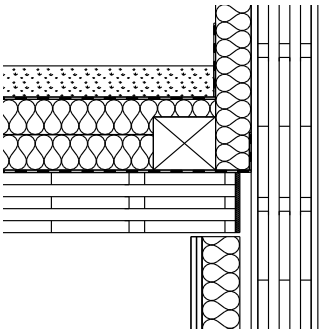


Deckenstoß mit Vorsatzschale

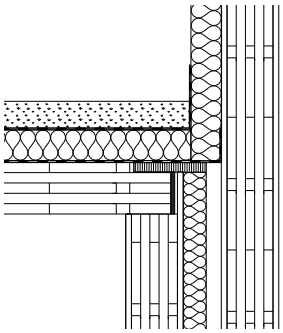


Deckenstoß bei 2-schaliger Ausführung

Abbildung 11: Ausführungsvorschläge für die Anbindung an die Decke



Dachabschluss mit Vorsatzschale



Dachabschluss bei 2-schaliger Ausführung

Abbildung 12: Ausführungsvorschläge für die Anbindung an ein Flachdach

Ebenfalls von großer Bedeutung ist die Ausführung der Aufzugtechnik. Die nachstehende Aufzählung zeigt exemplarisch, jedoch nicht abschließend, mögliche Kriterien, die bei der Technik des Aufzugs zu beachten sind.

- Geradelauf der Schienen
- Montage der Schienen nicht auf der Seite der schutzbedürftigen Empfangsräume
- Keine sogenannten Rucksackaufzüge / Führungsschienen sind nur auf einer Seite
- Geringe Oberflächenrauigkeit der Schienen
- Seilummantelung mit elastischen Materialien der Tragseile oder optimiert glatte Seile
- Versatzfreie Verbindung der Schienen an Stößen
- Vermeiden von abrupten Aufsetzpunkten an Stoppvorrichtungen und Haltepunkten
- An- und Abfahrbewegungen mit Verzögerung, «sanfter Übergang»
- Vermeiden, dass Seile, Kabel oder Teile der Anlage an den Schachtwänden schleifen
- Schallbrückenfreie Montage der Türen an 2-schaligen Schachtwänden

Auch Maßnahmen an der Quelle bzw. den Befestigungspunkten zwischen Schachtwand und Schienen können Geräuschimmissionen deutlich reduzieren. Hierzu zählen insbesondere statische/dynamisch bemessene elastische Zusatzlager an den Kontaktpunkten.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Aufzugschächte in Holzbauweise zeigen, unter Beachtung der dargestellten Konstruktionsempfehlungen, eine akustisch ebenbürtige Ausführung im Vergleich zu Massivschächten. Derzeit fehlt es jedoch an einer normativen Regelung für die Ausführung dieser Schächte in Holzbauweise. Es bleibt abzuwarten, ob die gewonnenen Erkenntnisse in die Überarbeitung von DIN 4109-33 einfließen werden. Aus bauakustischer Sicht lassen sich Schächte in Holzbauweise bei gezielter tieffrequenter Abstimmung der 2-schaligen Aufbauten sehr gut anwenden. Auch die schnelle Montage der Schächte und die gute Montierbarkeit der Technik im Schacht sind als Vorteile zu nennen. Für die Zukunft ist es wichtig, die Prognosemodelle fortzuschreiben und die belastbare Messung der eingeleiteten Körperschallleistung durchzuführen. Mit diesen Daten lässt sich dann der Fahrgeräuschpegel eines Aufzugs prognostizieren. Die Anwendbarkeit von Aufzugschächten in Holzbauweise unter dem akustischen Gesichtspunkt wurde bereits durch zahlreiche Messungen belegt und ist auch in [6] dargestellt.

5. Literaturverzeichnis

[1] Holzbau Deutschland Bund Deutscher Zimmermeister, «Lagebericht Zimmerer / Holzbau 2023,» Holzbau Deutschland Bund Deutscher Zimmermeister, Berlin, 2023.

[2] Beuth Verlag Normenausschuss Akustik, Lärmminderung und Schwingungstechnik, DIN 8989:08-2019 – Schallschutz in Gebäuden – Aufzüge, Berlin: Beuth Verlag, 2019 August.

[3] DIN 4109-1:01-2018 Schallschutz im Hochbau – Teil 1 Mindestanforderungen, Beuth-Verlag, 2018.

[4] A. Meier, «Baulicher Schallschutz für Aufzugsanlagen,» in DAGA 2016 Aachen, Aachen, 2016.

[5] DIN EN ISO 10052 Akustik – Messung der Luftschalldämmung und Trittschalldämmung und des Schalls von haustechnischen Anlagen in Gebäuden – Kurzverfahren (ISO 10052:2004 + Amd 1:2010); Deutsche Fassung EN ISO 10052:2004 + A1:2010, Beuth Verlag.

[6] A. Blödt und C. Höller, «Bestimmung der Schallleistung von Aufzugschächten aus Massivholz mit Hilfe eines Körperschall-Ersatzquellenverfahrens,» in DAGA 2023, Hamburg, 2023.

GEBÄUDE – technik | bauteile | materialien
Fassaden neu gedacht

Fassadenintegration von Photovoltaik und Begrünung im vorgefertigten Holzbausystem

Claudia Hemmerle
Technische Universität München
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie
und klimagerechtes Bauen
München, Deutschland



Manfred Stieglmeier
Fachhochschule Salzburg
Studiengang Green Building –
Design & Engineering
Kuchl, Österreich



Christine S. Hani
Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und
Baukonstruktion
München, Deutschland



Elisabeth Faßbender
Technische Universität München
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie
und klimagerechtes Bauen
München, Deutschland



Fassadenintegration von Photovoltaik und Begrünung im vorgefertigten Holzbausystem

1. Einleitung

Ein klimaneutraler Gebäudebestand lässt sich nur durch eine Steigerung der Sanierungsrate und gleichzeitiger Nutzung von erneuerbarer Energie in Neubau- und Sanierungskonzepte erreichen. Darüber hinaus verlangt der Klimawandel Anpassungsmaßnahmen, damit Städte auch in Zukunft ein gesundes Klima sicherstellen können. Die Bauten der 1950er bis 1980er Jahre entsprechen nicht mehr den zeitgemäßen energetischen Anforderungen und weisen zudem einen hohen Bedarf an Sanierung auf. Zudem ergeben sich bei diesem Bestand enorme Potentiale zur Einsparung wichtiger Ressourcen im Bereich der grauen Energie sowie zur energetischen Optimierung der Gebäudehülle. Der Einsatz von Bauprodukten aus nachwachsenden Rohstoffen reduziert dabei die Belastung der Umwelt und ist daher prädestiniert für die Modernisierung bestehender Bausubstanz. Vor diesem Hintergrund wurde die TES Energy Facade (Timber based Element System) für die Sanierung von außen mit vorgefertigten Holzbaukonstruktionen auf zukunftsfähige Standards entwickelt [1].

Das Forschungsprojekt greenTES ging einen Schritt weiter und untersuchte die Integration von Photovoltaik (PV) als gebäudeeigene erneuerbare Energiegewinnung und von Begrünungsmaßnahmen zur Verbesserung der stadtklimatischen Bedingungen. Die Kombination senkt die CO_2-Emmission mehrfach durch den Baustoff Holz als nachwachsenden Rohstoff und CO_2-Speicher, die emissionsfreie PV-Nutzung und durch den Erhalt von Gebäuden am Ende ihres Lebenszyklus, den eine rentable und zukunftsfähige Ertüchtigung ermöglichen kann. Basierend auf den Entwicklungen der TES Energy Facade wurde das «grüne» Bausystem und dessen systematischer Workflow für die «grünen» Komponenten PV und Begrünung erweitert. Die Forschung zielte dabei auf konkrete und in die Praxis übertragbare Lösungen ab und klärte kritische Integrationsfragen unterschiedlicher Begrünungssysteme und PV-Modulvarianten in Verbindung mit vorgefertigten Holzbausystemen am Beispiel der TES-Fassade. Anhand eines 1:1-Mock-Ups wurden sowohl konzeptionell konstruktive Entwicklungen erprobt und optimiert als auch bauphysikalische Implikationen mittels hygrothermischer Messungen und Simulationen untersucht. Brandschutztechnische Bewertungen erfolgten durch umfangreiche Brandversuche. Der vorliegende Beitrag basiert auf dem greenTES Forschungsbericht [2].

2. Konzeptentwicklung greenTES

2.1. Begrünungs- und Photovoltaiksysteme

Die Auswahl geeigneter Integrationssysteme berücksichtigte für die Begrünung die Kriterien Pflegeaufwand, Investitions-, Wartungs- und Instandhaltungskosten, Ressourcenverbrauch und Robustheit sowie für die Photovoltaik die möglichen Modulmaße und Farben, Klimaschutzbeiträge, ökologische und ökonomische Aspekte. In einem interdisziplinären Workshop legte das Projektteam fünf verschiedene Systeme für unterschiedliche gestalterische und konstruktive Anforderungen fest, die in Abbildung 1 visualisiert sind:

1 Selbstklimmer: Die bodengebundene Begrünung zeichnet sich durch geringen Raumbedarf aus, ist kostengünstig und pflegeleicht. Dabei wurzeln Kletterpflanzen – hier Efeu – direkt im Boden und ranken an der Fassade. Zum differenzierten hygrothermischen Vergleich wird eine Integration mit und ohne Hinterlüftungsebene erprobt.

2 Pflanztröge bieten den Vorteil von wandgebundenen Systemen, ein sofortiges grünes Fassadenbild, bei relativ geringen Investitionskosten. Geschossweise Pflanztröge, hier aus Edelstahl, werden mit Konsolen an der Außenwand befestigt und mit Gerüstkletterpflanzen sowie Rankhilfen bestückt. Der Pflegeaufwand ist gering.

3 Pflanzrinnen sind ein äußerst vielseitiges wandgebundenes System, das ein abwechslungs-reiches, ebenfalls sofort grünes Erscheinungsbild sowie eine hohe Biodiversität ermöglicht, jedoch mit höheren Investitionskosten und Pflegeaufwand verbunden ist. An einer Systemschiene hängen die Pflanzen in Spezialkulturtöpfen von Luft umgeben über einer freien Wasserebene in einzelnen Pflanzwannen.

4 PV-Dünnschichtmodule bieten ein homogenes, flächiges Gestaltungsbild und mit CIGS Solarzellen einen relativ hohen Wirkungsgrad, insbesondere bei fassadenbedingt ungünstigen Einstrahlungs- und Temperaturverhältnissen. Das gewählte Modell im Glas-Glas-Aufbau ist durch dünne Glasstärken und eine nicht sichtbare Befestigung mit rückseitig aufgeklebten Backrails gekennzeichnet.

5 PV-Module mit kristallinen Solarzellen stellen das marktdominierende Produkt mit hohen Wirkungsgraden dar und eignen sich im rahmenlosen Glas-Glas-Aufbau für beliebige Befestigungen des Glas- und Fassadenbaus. Gewählt wurde eine weitverbreitete mechanische Befestigung mit Randklemmhaltern.

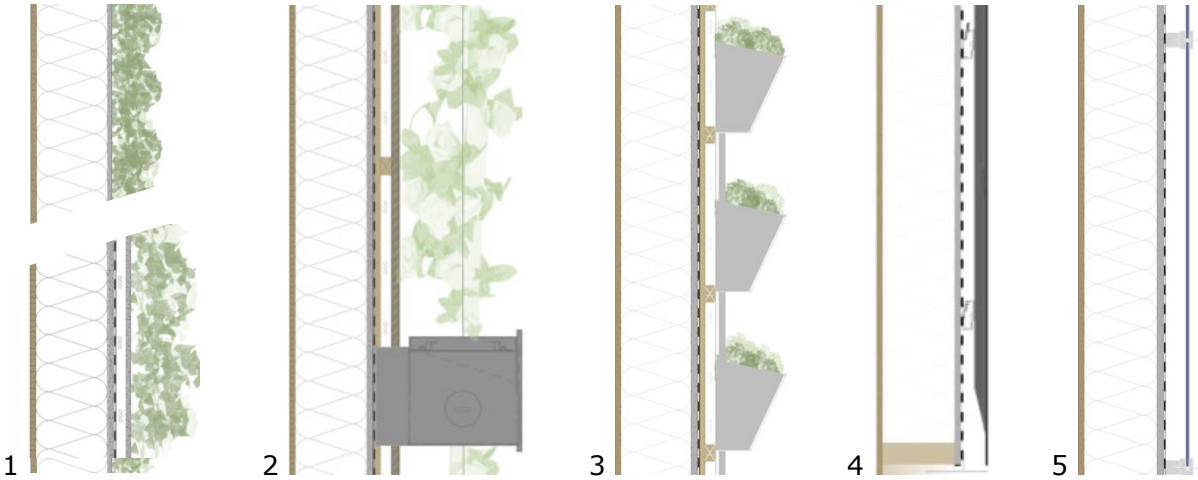


Abbildung 1: greenTES Systemvarianten [2]

Wandgebundene Begrünungen benötigen Bewässerungstechnik. Bei den gewählten Systemen erfolgt die Wasserversorgung über vertikale Schächte und eine horizontale Verbindung der Tröge bzw. eine kaskadenartige Überlaufbewässerung von der obersten Rinne aus mittels Schwerkraft. Wasserspeicher in den Pflanztrögen und -rinnen erhöhen die Resilienz gegenüber Ausfällen der Bewässerung und halten den Wartungsaufwand gering.

2.2. Konstruktive Integration



Abbildung 2: Mock-Up mit kristalliner Photovoltaik über Pflanzrinnensystem an der Südostfassade und Trogsystem an der Nordostfassade [2]

Die Wirkungen der Integration der fünf Begrünungs- und Photovoltaiksysteme in eine Außenwandkonstruktion aus Holztafelbauelementen wurden anhand eines Mock-Ups im Maßstab 1:1 untersucht (Abbildung 2). Das Mock-Up dient nicht nur der experimentellen konstruktiven Umsetzung, sondern auch der umfassenden Analyse und Messung möglicher bauphysikalischer Auswirkungen. Dafür wurde ein zweigeschossiger quaderförmiger Baukörper errichtet, der mit Bodenplatte und Dach allseitig geschlossen ist. Das Mock-Up ermöglicht zudem, dass die greenTES Konstruktionsvarianten an allen vier Fassadenseiten getestet und Varianten in Kombination und Ausrichtung erprobt werden können. Die unterschiedlichen Anordnungskombinationen liefern wertvolle Erkenntnisse über die Systemübergänge sowie Wachstum und Pflege bei den Begrünungselementen.

3. Bauphysik

Die Auswirkungen der integrierten Begrünungs- und PV-Systeme auf Wärme- und Feuchteschutz der Holztafelkonstruktion wurden durch Feuchte- und Temperaturmessungen am Mock-Up am Standort Binswangen über mehrere Monate und schließlich durch hygrothermische Simulationen analysiert, jeweils im Vergleich zu einer Referenzfassade im TES Standardaufbau mit einer Nut-Feder-Schalung als Fassadenbekleidung. Als Bewertungsgrundlage dienen unter anderem folgende Kriterien:

- maximal 20 M.-% Holzfeuchte nach DIN 68800 [3, 4] zur Vermeidung von Holzfäule bzw. maximale Porenluftfeuchte 95 % bei 0 °C und 86 % bei 30 °C nach WTA-Merkblatt 6-8 [5]
- maximal 18 M.-% Holzwerkstofffeuchte, vorübergehend bis zu 20 M.-% für maximal drei Monate nach DIN 68800-2 [4] für die Materialfestigkeit in überdachten, offenen Tragwerken, hier maßgeblich für die Zellulosedämmung
- Bewertung des Schimmelpilzrisikos für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen mit materialspezifischen Grenzisoplethen, für Zelluloseschüttung relative Luftfeuchte maximal 100 % bei 6 °C und 95 % bei 10 °C und höheren Temperaturen [6]

3.1. Feuchte- und Temperaturmessungen

Als Gegenstand der Messungen wurden die PV-Fassade mit Dünnschichtmodulen aufgrund der höheren Wärmeentwicklung bei geringeren Wirkungsgraden sowie die Grünfassadenvarianten mit Selbstklimmern wegen ihrer potenziell kritischen Feuchtelast ausgewählt. An den hygrothermisch relevanten Positionen in den Bauteilquerschnitten wurden folgende Sensoren angebracht: Oberflächentemperatursensoren in allen Schichten, Thermo-Hygro-Sensoren für die relative Feuchte innerhalb der Dämmung sowie drei Elektro-denpaare zur Messung der Holzfeuchte über die Tiefe des Holzständers (Abbildung 3).



Abbildung 3: Messstellen im Mock-Up (links) und Sensorpositionen in den Bauteilaufbauten (rechts, am Beispiel Selbstklimmer-Fassade mit Hinterlüftung): F – Fassade, D – Dämmung, H – Holzständer, Hl – Hinterlüftungsebene, i – innen, m – Mitte, a – außen [2]

Eine projekteigene Wetterstation direkt am Mock-Up zeichnete standortspezifische meteorologische Daten auf. Diese umfassen Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windrichtung und -geschwindigkeit, Globalstrahlung und langwellige Strahlung. Im Innenraum des Mock-Ups wurden Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit gemessen. Aufgrund eines Ausfalls der Wetterstation teilt sich der Auswertungszeitraum in zwei Abschnitte vom 09.02. bis 18.03.2023 und vom 13.05. bis 19.07.2023. Da zusätzlich die PV- und Selbstklimmer-Fassaden verspätet fertiggestellt wurden, liegt der Fokus im Folgenden auf der zweiten Periode. Die Plausibilität der ausgewerteten Messdaten aus den Bauteilen konnte durch einen Abgleich mit den meteorologischen Daten bestätigt werden.

Die Zusammenhänge von Wärmeleitung und Feuchtetransport durch die Dämmebene lassen sich mit den Kurvenverläufen der relativen Feuchte und Temperatur analysieren. Am Beispiel der nicht hinterlüfteten begrünten Fassade in Abbildung 4 zeigen sich zwischen den Positionen Da und Di eine Phasenverschiebung und Dämpfung der Temperatur sowie ein gegenläufiger Feuchteverlauf. Ein Anstieg der Temperatur führt zum Sinken der relativen Feuchte im Bauteil. Während diese Zusammenhänge ähnlich auch bei den übrigen Systemen ablesbar sind, zeigt die nicht hinterlüftete Grünfassade ein deutlich höheres Feuchteniveau an der kritischen äußeren Position Da. Auffällig ist außerdem ein Feuchteanstieg ab dem 20.06.2023. Dies tritt in etwas geringerer Ausprägung auch bei der hinterlüfteten Selbstklimmer-Variante auf und lässt sich durch Veränderungen in den Temperaturen, dem damit verbundenen Wasserdampfdiffusionstransport sowie vermehrte Niederschläge erklären. Somit führt die Begrünung der Fassade zu zusätzlichen Feuchteeinträgen auf die Konstruktion.

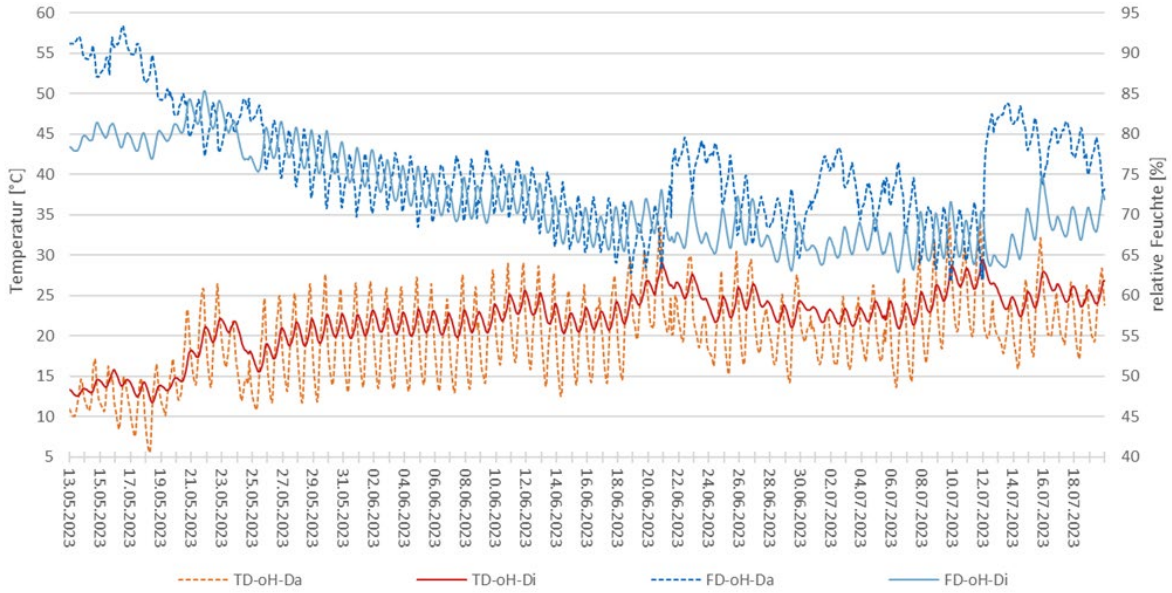


Abbildung 4: Verläufe der relativen Feuchte und Temperatur in der Dämmebene der nicht hinterlüfteten Selbstklimmer-Fassade im Zeitraum Mai bis Juli 2023 (Messstellen Da außen, Di innen) [2]

Zur genaueren Analyse kritischer Feuchten in der Zellulosedämmung wurde mit Hilfe der Sorptionsisotherme des Herstellers die Materialfeuchte an der Außenseite (Da) ermittelt und in Abbildung 5 vergleichend dargestellt. In der frühsommerlichen Messperiode zeigt sich bei allen Konstruktionsvarianten erwartungsgemäß ein allgemeiner Feuchterückgang. Bei den hinterlüfteten Fassadenvarianten liegen die durchschnittlichen Feuchtegehalte zwischen 9,8 M.-% (PV) und 10,9 M.-% (Selbstklimmer mH). Dies spricht für eine effektive Feuchtigkeitsregulierung in den Konstruktionen. Demgegenüber fallen in den Feuchtigkeitsdaten der nicht hinterlüfteten begrünten Fassade größere Unstetigkeit und Schwankungen auf und die Dämmung ist mit durchschnittlichen 12,4 M.-% feuchter. Am 16.05. übersteigt der Wert mit 18,5 M.-% für drei Stunden den Grenzwert von 18 M.-%. Diese Situation ist vor allem für den betrachteten warmen Zeitraum ungewöhnlich und deutet auf ein mögliches Defizit im Feuchteschutz dieser Konstruktionsvariante hin.

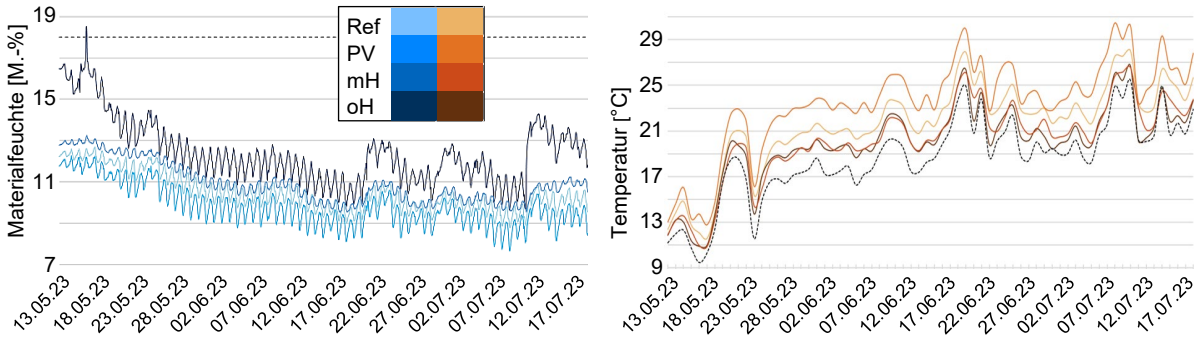


Abbildung 5: Messergebnisse am Mock-Up im Zeitraum Mai bis Juli 2023: links Materialfeuchte, rechts Temperaturverläufe an den Außenseiten der Zellulosedämmung (Messstelle Da) [2]

Auch die Analyse des Feuchtigkeitsverlaufs über die Tiefe des Holzständers verdeutlichte bei allen Konstruktionen den erwünschten Austrocknungsprozess von innen nach außen sowie anfänglich leicht höhere äußere Holzfeuchten der nicht hinterlüfteten Grünfassade. Keine der Fassaden überschritt den Grenzwert für die Holzfeuchte von 20 M.-%.

Für den Vergleich der Temperaturverläufe der Konstruktionsvarianten in Abbildung 5 rechts dient ebenfalls die Position Da als Referenzpunkt und das Tagesmittel T-Da als maßgeblicher Indikator für den Einfluss der Außenbedingungen bzw. Bekleidungen. Die PV-Fassade stellte sich mit einer Durchschnittstemperatur von 23,4 °C als wärmste Variante heraus und die beiden begrünten Fassaden mit 20,0 °C (ohne Hinterlüftung) bzw. 20,2 °C (mit Hinterlüftung) als die kühlsten. Die rückseitige Wärmeabstrahlung der PV-Module heizt die dahinterliegende Hinterlüftungsebene sowie das Bauteil auf, was den hohen außenseitigen Austrocknungsgrad der Konstruktion in Abbildung 5 links erklärt. Insgesamt lassen sich die Messergebnisse der Varianten jedoch nicht direkt vergleichen. Die Unterschiede sind nicht allein auf das Materialverhalten zurückzuführen, sondern auch den jeweiligen Orientierungen und beispielsweise einer geringeren Verschattung der höher gelegenen PV-Fläche im Vergleich zur Referenzfassade geschuldet. Aufgrund des begrenzten Messzeitraums ohne vollständige und eingependelte Winterperiode sowie wegen des unkonditionierten Innenraums ohne interne Feuchtequellen eignen sich die Messergebnisse auch nur bedingt für eine unmittelbare bauphysikalische Bewertung.

3.2. numerische Simulationen

Die ganzjährig und langfristig auftretenden hygrothermischen Implikationen unter vergleichbaren und verschiedenen relevanten Rahmenbedingungen lassen sich nur durch Simulationen analysieren. Hierfür kam die etablierte und vielfach validierte Software WUFI zum Einsatz. Diese berechnet instationäre Wärme- und Feuchtefelder über einen Bauteilquerschnitt und erlaubt einen Feuchteschutznachweis im Holzbau [7, 8]. Während die Holztafelkonstruktion mit softwareinternen Materialdatensätzen abgebildet werden konnten, erforderten die integrierte Photovoltaik und Begrünung eine eigene Modellentwicklung. Für die Fassadenbegrünung wurde dazu eine Luftschicht mit einer Feuchtequelle kombiniert. Das Modell der Photovoltaikmodule basiert auf dem Materialdatensatz für Glas mit entsprechender Albedo. Die Dimensionierung und Anpassung von Materialkennwerten stützte sich auf Literatur und Herstellerangaben. Zur Validierung des Simulationsmodells mit den neu entwickelten Materialdatensätzen wurden die Konstruktionsvarianten des Mock-Ups implementiert und unter Verwendung der erhobenen meteorologischen Daten und simuliert. Die Auswertung und iterative Optimierung dreier Modellvarianten ergab trotz größerer Untersicherheiten bei wechselhaftem Wetter insgesamt eine hohe Korrelation zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen, so dass das Modell für die hygrothermische Beurteilung der greenTES Konstruktionen als geeignet erachtet wurde. Einschränkend muss jedoch auf die fehlende Validierung für die Winterperiode hingewiesen werden, für die keine ausreichenden Messdaten vorliegen. [2]

In den Simulationen wurde für die Außenklimaverhältnisse das in WUFI hinterlegte Testreferenzjahr für Holzkirchen als regenreicher Standort mit einer Niederschlagshöhe von 1185 mm/a verwendet und für das Innenklima der Datensatz nach DIN 4108-2. Die Aus-

wertung umfasst das Jahr 2026, da sich der Wassergehalt in diesem Jahr für alle Fassadenvarianten eingependelt hat, und betrachtet in Bezug auf die Feuchte wiederum kritische Außenseite der Zellulosedämmung (Da)

Beim simulierten Wassergehalt in der Dämmung ergab sich für die Referenzfassade und die PV-Fassade keine Überschreitung der zulässigen Obergrenze von 18 M.-%. Dagegen kann in der begrünten Fassade mit Hinterlüftung im Zeitraum von Anfang Oktober bis Anfang Mai weder der 18 M.-% Grenzwert eingehalten werden noch die vorübergehende Überschreitung bis 20 M.-% über maximal drei Monate. Somit ist die Konstruktion als kritisch in Hinsicht auf Akkumulation von Feuchte einzuschätzen. In der begrünten Fassade ohne Hinterlüftung wird der Grenzwert von 18 M.-% fast das gesamte Jahr überschritten und im Januar erreicht die Feuchteakkumulation bis zu 105 M.-%, siehe grüne Kurve in Abbildung 6.

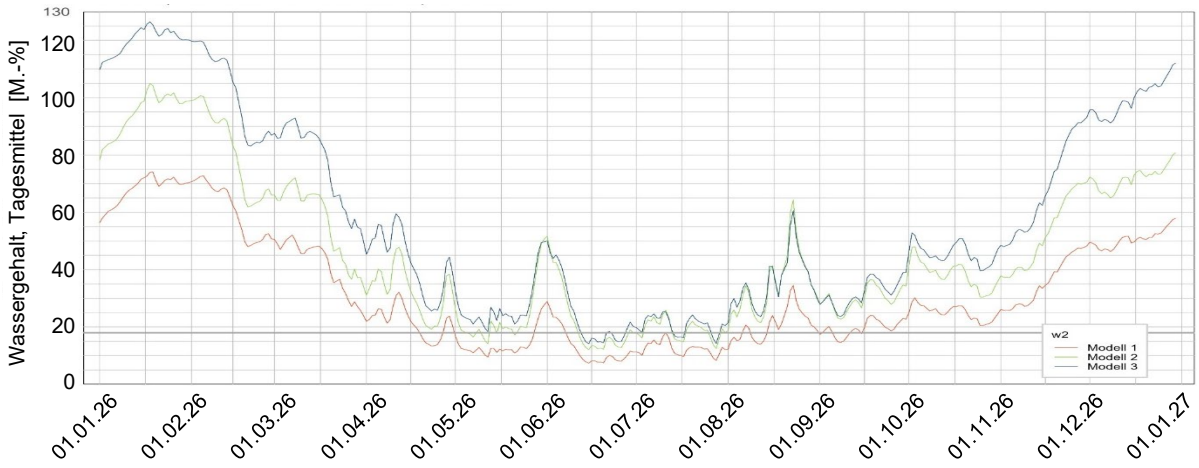


Abbildung 6: Verlauf der Materialfeuchte an der Außenseite der Dämmung in der nicht hinterlüfteten Selbstklimmer-Fassade bei Orientierung nach Süd-West. Für die Wintermonate ist die Modellvariante 2 (grüne Kurve) am besten geeignet und damit maßgeblich für die Bewertung. [2]

Durch eine temperaturabhängige Auswertung der Porenluftfeuchte in den äußeren 10 mm der Zellulosedämmung und einen Vergleich mit den in [6] bestimmten Isoplethen für Zelluloseschüttung in keiner der Konstruktionen ein Risiko für Schimmelpilzbildung festgestellt werden. Die simulierten Feuchtewerte lagen unterhalb der Grenzkurve für eine Auskeimung bzw. Wachstumswahrscheinlichkeit von Schimmelpilzen.

3.3. Bewertung der hygrothermischen Eigenschaften

Sowohl die Photovoltaik als auch die Begrünung beeinflussen die Temperatur- und Feuchteverhältnisse in der greenTES Holzkonstruktion. Die hinterlüftete Integration von PV-Modulen führt zu höheren Temperaturen in allen Bauteilschichten, insbesondere in den äußeren. Dadurch trocknet das Bauteil besser aus, was mit den durchgeführten Messungen und Simulationen nachgewiesen werden konnte: an der kritischen äußeren Position der Dämmung reduzierten sich die relative Luftfeuchte, Material- und Porenluftfeuchte gegenüber der Referenzfassade. An der Innenwand und der Innenseite der Dämmung traten im Sommer nur geringfügig höhere Temperaturen auf. Somit wird das Innenraumklima bei ausreichender Dämmstärke nicht beeinflusst. Die Photovoltaikintegration reduziert das Risiko von Schimmelpilzbildung und Tauwasserausfall in der Konstruktion und kann bauphysikalisch als unbedenklich für eine Anwendung in Neubau und Bestandssanierung eingestuft werden.

Die untersuchte Fassadenbegrünung hat einen Kühleffekt auf die Konstruktion und gleichzeitig höhere Feuchtewerte als die Referenzfassade. In der Variante ohne Hinterlüftungsebene sind die Feuchtewerte stets höher als bei der hinterlüfteten. Als potentiell kritisch erwiesen sich einerseits die Materialfeuchte in der Dämmung und das Rücktrocknungsvermögen, andererseits die Unsicherheiten der simulierten Bauteilfeuchten angesichts der unzureichenden Validierung des Simulationsmodells für den Winterfall. Eine ausführliche hygrothermische Bewertung erfolgt in [2].

4. Brandschutz

4.1. Bauordnungsrechtliche Anforderungen an greenTES

Neben der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit bestehen für die greenTES-Elemente Anforderungen an den Brandschutz. Die im folgenden erläuterten Inhalte beziehen sich auf die von den zuständigen Gremien der Bauministerkonferenz der Bundesländer (ARGEBAU) veröffentlichte Musterbauordnung (MBO [9]) und die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB [10]). Die Landesbauvorschriften sind mit Ausnahmen annähernd inhaltsgleich übernommen.

Die greenTES-Elemente sind nach MBO §2 (11) eine, zu einem Teil einer baulichen Anlage gefügte, Bauart. Daher ist eine allgemeine Bauartgenehmigung (aBG) durch das Deutsche Institut für Bautechnik oder eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBg) durch die oberste Bauaufsichtsbehörde (MBO §16a) notwendig.

Eine Fassadenbegrünung (Pflanzen) ist nach BauPVO kein Bauprodukt, weswegen diese im Nachfolgenden nicht berücksichtigt wird. [11] Bezüglich des Brandverhaltens von Fassadenbegrünungen wird auf den diesbezüglichen Tagungsbandbeitrag verwiesen [12]. Rankgitter und Befestigungen müssen die Anforderungen der MBO als Bauprodukte einhalten. [9]

Bei den bauwerksintegrierten Photovoltaikmodulen (BIPV) handelt es sich aufgrund ihres dauerhaften Einbaus in bauliche Anlagen um Bauprodukte bzw. eine Bauart (BauPVO 305/2011 [11]). Die in der MBO gestellten Anforderungen werden in der MVV TB konkretisiert. Für Bauwerke ist generell mindestens eine Normalentflammbarkeit aller Baustoffe gefordert (§26 Abs. 1 Satz 2 MBO). Nach MBO §28 wird an Außenwände der Gebäudeklassen 4 und 5 zusätzlich eine Schwerentflammbarkeit für Außenwandbekleidungen und Unterkonstruktionen gefordert, sowie dass die Bestandteile im Brandfall nicht brennend abtropfen oder abfallen dürfen. Für Photovoltaikanlagen, welche nicht mehr als zwei Geschosse überbrücken, können auch als normalentflammbares Bauprodukt eingebaut werden (§28 Abs. 3 Satz 2 MBO). Als geschossübergreifende, hinterlüftete Sanierungsmethode werden nach MBO §28 (4) besondere Maßnahmen gegen die Brandausbreitung gefordert. Für greenTES wird die Ausführung der Brandsperren nach MHolzBauRL umgesetzt. [9, 13]

Zur Untersuchung des Brandverhaltens der BIPV-Module wurden im Forschungsprojekt zwei Großbrandversuche in Anlehnung an DIN 4102-20 [14] durchgeführt. Hierbei wurden in beiden Versuchen neben der Brandausbreitung, Wechselwirkungen zwischen den greenTES-Fassadentypen sowie die Ausbildung der Hinterlüftungsebene mit Schutzwirkung der Brandsperren untersucht.

4.2. Brandversuche und brandschutztechnische Bewertung

Um auf die greenTES-Bauart Bezug zu nehmen, wurde der Versuchsaufbau des Brandversuchs nach DIN 4102-20, wie in Tabelle 1 zu erkennen, abgewandelt. Anstatt zweier miteinander verbundener Wände in mineralischer Ausführung wurden in beiden Versuchen Holztafelwände verwendet. Diese wurden Richtung Außenwandbekleidung mit einer 18 mm Gipsfaserplatte beplankt. Die Brandlast nach Norm beträgt als Holzkrippe 30 ± 1,5 kg. Für den ersten Brandversuch wurde die Holzkrippe hiernach dimensioniert. Für den zweiten Brandversuch ergab sich aus den Ergebnissen des ersten Versuches eine Bemessung der Brandkrippen von sechs Stück mit rund 35 kg/Krippe. Für den zweiten Versuch war Ziel, die Wechselwirkungen der Module in linearer Ausbildung mit vorgestellten Brandbeanspruchung zu prüfen. Hier wurde keine Ecksituation abgebildet. [14] Weitere detaillierte Ergebnisse zu den Versuchen sind im Forschungsbericht zu finden. [2]

Tabelle 2: Abweichungen in den Brandversuchen zur DIN 4102-20

	DIN 4102-20:2017 [14]	Großbrandversuch 1	Großbrandversuch 2
Bauweise Wände	Mineralisch massiv	Holztafelwand mit 18 mm GFK	Holztafelwand mit 18 mm GFK
Anordnung Wände	Über Eck	Über Eck	Linear
Art der Brandlast	1 x 30 ± 1,5 kg Holzkrippe bzw. Gasbrenner	1 x 31,0 kg Holzkrippe	6 x 35,7 kg Holzkrippe
Anordnung Brandlast	Brandkammer + Ventilator	Brandkammer + Ventilator	Vorgestellt

In Abbildung 7 ist der erste Großbrandversuch mit einer hinterlüfteten PV-Fassade zu erkennen. Die Brandentstehung wurde durch eine Holzkrippe in der Brandkammer unterhalb der ersten Brandsperre simuliert. Bereits nach der dritten Minute nach Versuchsbeginn stand das horizontale PV-Modul unter direkter Brandbeanspruchung, brach und fiel kleinteilig ab. Bereits vor Ablöschen der Holzkrippe in der 20. Minute konnte in der 17. Minute ein Selbstverlöschen des PV-Moduls festgestellt werden. In der Beobachtungsphase konnten nach dem Ablöschen der Krippe keine Auffälligkeiten festgehalten werden.

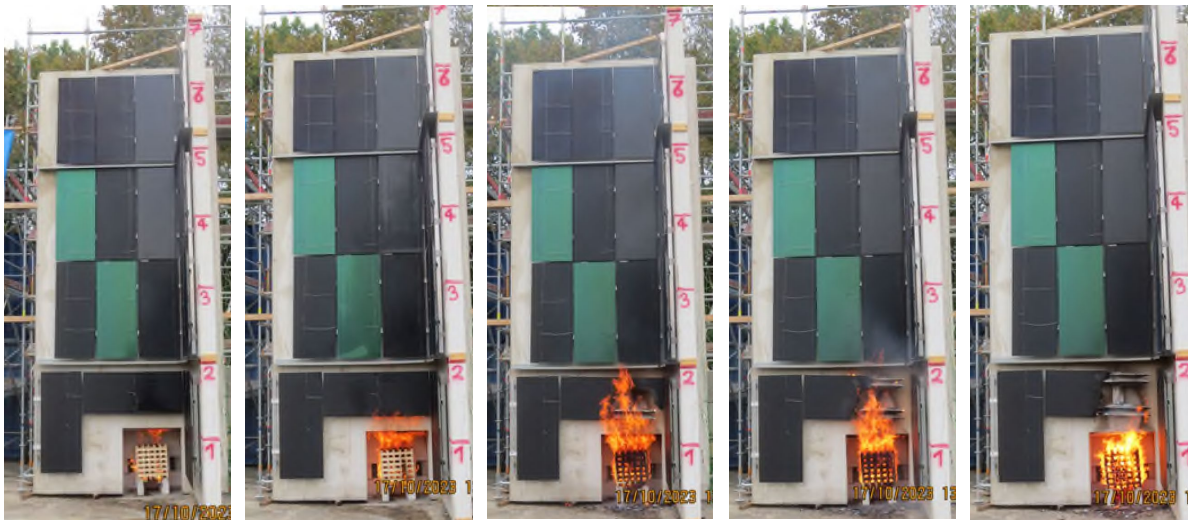


Abbildung 7: Prüfkörper 1 während des Brandversuches (von links nach rechts: Minute 2, 3, 9, 10, 17)

Im zweiten Großbrandversuch wurde abweichend vom ersten Versuch eine lineare Anordnung der Prüfkörper gewählt. Hierbei war Ziel der Untersuchung, den Einfluss unterschiedlicher Ausführungen der greenTES-Module und deren Wechselwirkung zu prüfen sowie auf Basis der Ergebnisse aus dem ersten Brandversuch das Brandverhalten der PV-Module vertieft zu untersuchen. Der Ablauf des Versuches ist in Abbildung 8 dargestellt. Auf der linken Seite ist das greenTES-Modul nach [13] bzw. [15] mit Holzbekleidung und auf der rechten Seite mit einer Außenwandbekleidung aus Dünnschichtphotovoltaikmodulen gefertigt. In beiden Varianten sind Brandsperren ebenfalls nach [13] bzw. [15] befestigt. Die Holzkrippen befinden sich hier vorgestellt an der Fassade. In der 5. Prüfminute ist zu erkennen, dass das Modul, welches sich in der Brandbeaufschlagung befindet, abfiel. Auch nach der zehnten Minute fiel ein weiteres Modul im Ganzen ab. Die Brandausbreitung wurde durch die horizontalen Brandsperren eingegrenzt. Nach Ablöschen der Brandlast in der 20. Minute war in der Beobachtungsphase eine Brandausbreitung am linken Prüfkörper im Hinterlüftungsspalt zu erkennen. Die horizontalen und vertikalen Brandsperren verhinderten einen weiteren Brandüberschlag.



Abbildung 8: Prüfkörper während des Brandversuches (von links nach rechts: Minute 2, 3, 4, 10, 17)

Die brandschutztechnischen Maßnahmen nach [13] und [15] an der Holzfassade behinderten bzw. verzögerten die Brandausbreitung und dienten wie zuvor beschreiben als Referenz zu den Photovoltaikmodulen. Die Dünnschichtphotovoltaikmodule in der im Forschungsprojekt gewählten Bauweise zeigten in Verbindung mit den gewählten brandschutztechnischen Maßnahmen u.a. der horizontalen Brandsperren je Geschoss eine begrenzte Brandausbreitung bis zur dritten Modulhöhe. Die Module bis zur zweiten Reihe befanden sich unter direkter Brandbeanspruchung. Es zeigte sich, dass nach Abplatzen der hinteren Glasscheibe eines Moduls eine Brandausbreitung bis zur darüber liegenden PV – nicht jedoch über die Brandsperren – auftrat. Die abschließende, detaillierte Bewertung der Brandausbreitung ist im Forschungsbericht zu finden [2]. Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlich ausgeführten greenTES-Varianten waren zu erkennen und sind im Planungsablauf zu berücksichtigen. Ein wirksames Löschkonzept ist mit der zuständigen Feuerwehr und dem Elektrofachplaner rechtzeitig abzusprechen.

5. Workflow und Planungsprozesse in der Baupraxis

Im vorgefertigten Holzbau unterscheiden sich die Planungsabläufe gegenüber einer konventionellen Bauweise deutlich. Die Vorfertigung zeichnet sich vor allem durch die Produktion von Bauelementen in der Werkstatt aus. Die Vielschichtigkeit des Holzrahmenbaus, auf dem die Entwicklung des TES-Elements beruht, bewirkt, dass sämtliche Bauteile immer integral mit allen Schichten betrachtet werden müssen: Vor allem Brandschutz und Schallschutz in den Innenbauteilen, aber auch Feuchte- und Wärmeschutz in der Hülle werden fast immer von Rohbau und Ausbau gemeinsam geleistet. Daher müssen auch alle Schichten zusammen konzipiert werden. Dieser Logik folgend, müssen die im Elementaufbau zu integrierenden Komponenten wie PV- und Begrünungssysteme ebenfalls früh im Planungsprozess mitgedacht werden.

Im Zuge der Festlegung der Außenwandstärke muss das gewählte System feststehen, da unterschiedliche Komponenten der Befestigung differenzierte Aufbauten bei der Montage in der Bekleidungsebene nach sich ziehen und damit die Stärke des Wandaufbaus verändern können. Spätestens im Zuge der Leistungsphase Entwurfsplanung (LP 3 nach HOAI) müssen die Rahmenbedingungen des PV- und Begrünungssystem feststehen, nicht zuletzt auch wegen eines einheitlichen Fugenbildes in der Fassadenabwicklung. Die Fassadenentwicklung ist ebenfalls Teil der Entwurfsplanung und erfordert Kenntnis über Abmessungen der PV-Module oder der Rinnenlänge bei Begrünungssystemen. Die Abmessungen haben Einfluss auf die Elementteilung und der Lage der Elementstöße im Fassadenbild. Änderungen in der Bekleidungsebene sind zwar leichter möglich als in der Konstruktionsebene, aber nach Festlegung der Fertigungsplanung und der Schnittstellen der Gewerke ist eine Änderung mit großem Aufwand verbunden.

Die Schnittstellendefinition der ausführenden Gewerke ist durch die Trennung von Installation und Konstruktion des Holzbaus festgelegt. Die Strategie wird durch die Entwicklung des Versorgungselements als Sonderelement definiert (Abbildung 9 und 10). Durch das Sonderelement wird ermöglicht, dass der Holzbau den konstruktiven Hohlraum für die Schachtausbildung schafft. Das Schachtelement kann entweder mit den Installationen durch das ausführende Installationsgewerk im Werk des Holzbauers bestückt werden oder das Holzbauunternehmen legt Leerrohre zur späteren Bestückung in den Schacht vor dem

Verschließen ein. In jedem Fall kann das Schachtelement im regulären Prozessablauf mit den anderen Elementen mit produziert werden.

Durch Integration der PV- und Begrünungsmodule in der Ebene der Außenbekleidung, also vor der Abdichtungsebene, ist die Konstruktionsebene vor Auswirkungen von Undichtigkeiten geschützt. Produktionsabläufe zur Vorfertigung des TES-Systems müssen aufgrund des Sonderelements für die Installationen nicht geändert werden. Der Workflow kann beibehalten werden. Sowohl die Bewässerung für die Bepflanzung als auch die elektrischen Leitungen für den Anschluss der Photovoltaikmodule können in den Prozessablauf integriert werden.

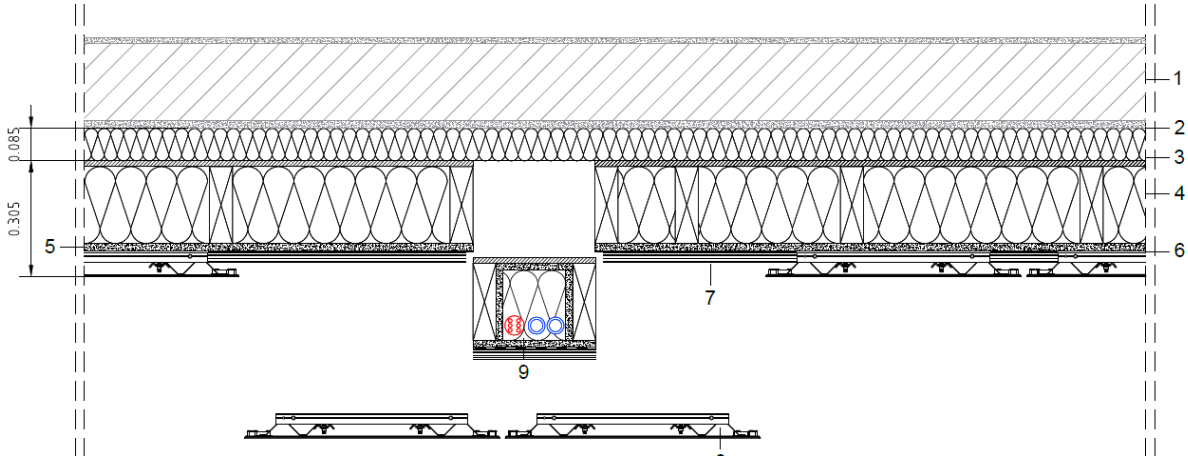


Abbildung 9: Detail Horizontalschnitt: Elementstoß Schachtelement – PV-Element

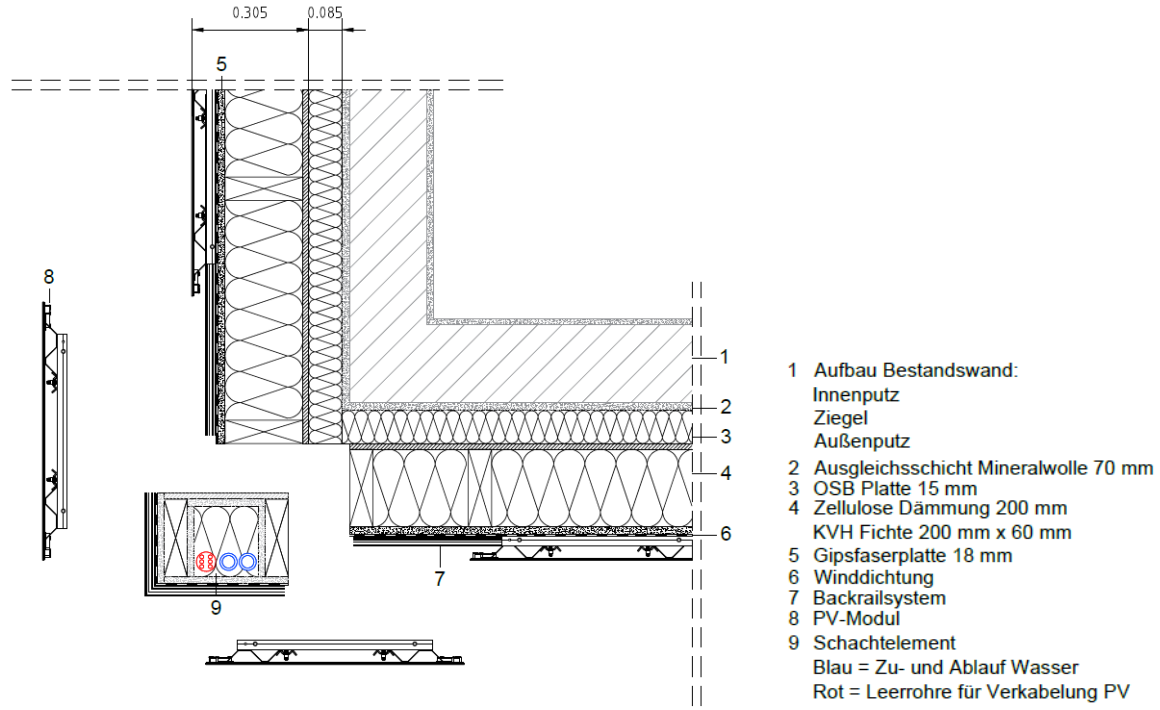


Abbildung 10: Detail Horizontalschnitt: Eckausbildung Schachtelement – PV-Element

6. Zusammenfassung und Ausblick

Für unterschiedliche gestalterische, konstruktive und wirtschaftliche Ansprüche wurden übertragbare Lösungen zur Anwendung von Photovoltaik und Begrünung in vorgefertigten Holzbaukonstruktionen entwickelt und Detaillösungen für die Befestigung und Anschlüsse erarbeitet. Die Varianten umfassen geklebt und mechanisch befestigte Photovoltaikmodule in Dünnschicht- oder kristalliner Technologie sowie die Begrünungssysteme bodengebundene Selbstklimmer mit oder ohne Hinterlüftungsebene und wandgebundene

Pflanztröge oder -rinnen. Die Führung der erforderlichen Strom- und Bewässerungsleitungen wurden über einen Versorgungsschachts als Sonderelement gelöst. Die praktische Umsetzbarkeit aller Konstruktionsvarianten wurde anhand eines Mock-Ups belegt. Die Evaluierung der bauphysikalischen Implikationen auf die Holzkonstruktion erfolgte anhand von mehrmonatigen Feuchte- und Temperaturmessungen am Mock-Up und durch hygrothermische Simulationen. Letztere erforderte die Neuentwicklung von Modellelementen für die Fassadenbegrünung und Photovoltaik, welche anhand der Messungen validiert wurden. Dabei zeigte sich, dass insbesondere bodengebundenen Begrünungssystemen eine Hinterlüftung mit hohem Luftwechsel benötigen, um den zusätzlichen Feuchteeintrag der Pflanzen abzuführen und Schäden an der Holzkonstruktion zu vermeiden. Die PV-Fassade erwies sich als bauphysikalisch unbedenklich. Brandschutztechnischer Untersuchungsbedarf bestand in erster Linie bezüglich der Photovoltaik-Integration. Hier zeigten zwei Großbrandversuche, dass die Photovoltaikmodule keine Brandweiterleitung über mehrere Geschosse verursachen, jedoch herabfallende Module eine Herausforderung für Lösch- und Rettungsversuche darstellen können. Der Baupraxis werden die Forschungsergebnisse in Form eines Planungsleitfadens und digitaler Musterdetails zur Verfügung gestellt. Diese Arbeitshilfen helfen den objektspezifischen Entwicklungsaufwand zu minimieren.

Als weiterer Forschungsbedarf verbleiben zusätzliche hygrothermische Messungen über einen längeren Zeitraum einschließlich Winterperiode und mit einem beheizten Innenraum, um das Simulationsmodell vollumfänglich zu validieren. Auch für eine vollständige brandschutztechnische Bewertung sind weitere Versuche bei laufendem Betrieb der PV-Anlage inklusive Kabelführung und mit einer Dämmebene im Prüfkörper notwendig. Für eine erste praktische Umsetzung der entwickelten Schachtlösung sowie weitere konstruktive und prozesstechnische Untersuchungen steht die Anwendung der greenTES Fassaden an einem realen Bauprojekt noch aus.

7. Danksagung

Die Ergebnisse entstanden im Projekt greenTES. Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen aus Mitteln der Zukunft Bau Forschungsförderung. Die Autor*innen danken allen Projektbeteiligten, den Praxispartnern Gumpp & Maier GmbH, Lattke Architekten und Prof. Dr.-Ing. Nicole Pfoser sowie den Drittmittelgebern Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Cluster-Initiative Forst und Holz Bayern, Solarenergieförderverein Bayern e.V., Landesbetrieb Wald und Holz Nordrheinwestfalen, AVANCIS GmbH und GES Gebäude-Energiesysteme GmbH. Ein besonderer Dank gilt der Gumpp & Maier GmbH und AVANCIS GmbH, dem Forschungs- und Versuchslabor für Haustechnik des Lehrstuhls für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen sowie der Werkfeuerwehr Garching der TU München für ihr außerordentliches Engagement bei der Errichtung des Mock-Ups und den Brandversuchen.

8. Literaturverzeichnis

[1] Heikkinen, Pekka; Kaufmann, Hermann; Winter, Stefan; Larsen, Knut Einar: *TES EnergyFaçade – prefabricated timber based building system for improving the energy efficiency of the building envelope*. 2010

[2] Fassbender, Elisabeth; Hani, Christine; Glas, Benedikt; Keller, Serena; Wirth, Hanna; Horn, Tabea; Stieglmeier, Manfred; Hemmerle, Claudia: *greenTES: Fassadenintegration von Photovoltaik und Begrünung im vorgefertigten Holzbausystem.* in Veröffentlichung. Bonn, 2024 (BBSR-Online-Publikation)

[3] DIN 68800-1: 2019-06 *Holzschutz – Teil 1: Allgemeines*

[4] DIN 68800-2: 2022-02 *Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*

[5] WTA-Merkblatt 6-8 *Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation*

[6] Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg.): *Untersuchungen zur Optimierung und Standardisierung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen*: *Gemeinsamer Abschlussbericht zum Verbundvorhaben*. Holzkirchen, 2008

[7] *WuFi®*: *Hygrothermische Simulationssoftware*: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. URL https://wufi.de/ – Überprüfungsdatum 2023-11-16

[8] KÜNZEL, Hartwig: *Verfahren zur ein- und Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten.* Stuttgart, Universität Stuttgart. Dissertation. 1994.

[9] BAUMINISTERKONFERENZ: *MUSTERBAUORDNUNG* (2019)

[10] Deutsches Institut für Bautechnik: *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen* (2023)

[11] Europäisches Parlament und Rat: *VERORDNUNG (EU) Nr. 305/2011 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates* (2011)

[12] Engel, Thomas: Fassadenbegrünung an mehrgeschossigen Gebäuden aus brandschutztechnischer Sicht. In: Forum Holzbau (Hg.): *Tagungsband Bauphysik & Gebäudetechnik (BGT)*, 2024

[13] Deutsches Institut für Bautechnik: *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise* (2020)

[14] DIN 4102-20: 2017-10 *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen*

[15] Engel, Thomas; Werther, Norman: *Structural Means for Fire-Safe Wooden Façade Design*. In: *Fire Technology* 59 (2023), Nr. 1, S. 117–151

Coole Hülle – Holzfassaden bauphysikalisch beleuchtet

Dr. Bernd Nusser
Holzforschung Austria
Wien, Österreich



Mara Schumacher M.Sc.
Holzforschung Austria
Wien, Österreich



Dr. Christian Lux
Holzforschung Austria
Wien, Österreich



DI Johannes Tieben
Holzforschung Austria
Wien, Österreich



Coole Hülle – Holzfassaden bauphysikalisch beleuchtet

1. Einleitung

Die Sommer werden heißer, dadurch rückt auch der sommerliche Wärmschutz von Gebäuden weiter in den Fokus. Im kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekt «Coole Hülle» widmete sich die Holzforschung Austria zusammen mit Partnern aus der Industrie und dem Handwerk der primären Frage, inwieweit der sommerliche Wärmeeintrag in Gebäude durch optimierte Holzfassaden reduziert werden kann. Um durch die thermisch motivierte Verbesserung der Holzfassaden nicht andere wichtige Gesichtspunkte wie Schallschutz und Feuchteresistenz zu verschlechtern, wurden auch diese Eigenschaften der Holzfassaden untersucht. Über die baupraktischen Erkenntnisse aus dem Projekt zu den Themen Schallschutz und Wärmeschutz wird nachfolgend berichtet.
Die Inhalte dieses Beitrags sind bereits in [1] und [2] erschienen. Die baupraktischen Projektergebnisse zum Thema «Feuchetresistenz» können [3] entnommen werden.

2. Schallschutz

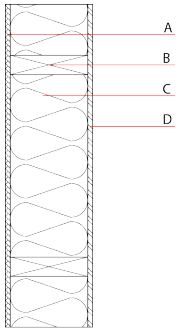
2.1. Untersuchte Bauteile

Zur Ermittlung des bauakustischen Einflusses von Holzfassaden wurden primär folgende zwei Fassadenarten untersucht:

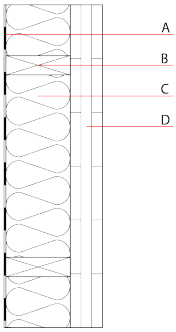
- Geschlossene Fassade
  (19 mm Lärche, Nut + Feder, vertikal, 30 mm Traglattung, 30 mm Konterlattung
  → 30 mm freier Hinterlüftungsspalt)
- Offene Fassade
  (21 mm Lärche Rhombusleisten, horizontal, 14 mm Fugen, 30 mm Traglattung)

Die verschiedenen Fassaden wurden jeweils auf eine Holzrahmenwand und eine BSP-Wand aufgebracht. Tab. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Grundwände ohne Fassade. Da der Fokus auf den Fassadensystemen lag, wurden auf der Innenseite der Grundwände keine weiteren Schichten wie Gipskartonbeplankungen, Installationsebenen oder Vorsatzschalen aufgebracht. Die Schalldämm-Maße der untersuchten Wandvarianten werden beim Anbringen weiterer innenseitiger Schichten – vor allem bei den Holzrahmenwänden – somit höher ausfallen als nachfolgend gezeigt. In [4] und [5] kann nachgelesen werden, wie sich die einzelnen Schichten bei Außenwänden bauakustisch auswirken.

Tabelle 1: Eingesetzte Grundwände zur bauakustischen Untersuchung der Fassadenvarianten



A: 16 mm MDF (außen)
B: (240 x 60) mm² Steher (e = 625 mm)
C: 240 mm Mineralwolle
D: 15 mm OSB



A: Fassadenbahn
B: (200 x 60) mm² Steher (e = 625 mm)
C: 200 mm Mineralwolle
D: 100 mm BSP 3-lagig

2.2. Einfluss der Fassadenart

Die nachfolgenden Grafiken zeigen die Schalldämm-Maße der verschiedenen Wandvarianten. In den Legenden sind jeweils auch die zugehörigen Einzahlkennwerte R_w, $R_w + C_{50\text{-}5000}$ und $R_w + C_{tr,50\text{-}5000}$ dargestellt. Alle Messungen wurden in den beiden Wandprüfständen des Akustik Center Austria durchgeführt. Bei allen nachfolgenden Varianten waren die Zu- und Abluftöffnung des Hinterlüftungsspalts offen.

Anmerkung: Vergleichsmessungen zwischen den beiden Wandprüfständen im Akustik Center Austria zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Dennoch kann es vorkommen, dass sich die nachfolgend aufgeführten Einzahlkennwerte der nominell selben Wände geringfügig unterscheiden.

Anhand von Abb. 1 wird der Einfluss der Fassadenart auf die Schalldämmung einer Holzrahmen- bzw. einer BSP-Wand ersichtlich. Wie sich zeigt, führt eine geschlossene Fassade im Frequenzbereich > 500 Hz bei beiden Wänden zu höheren Schalldämm-Maßen als eine offene Fassade. Dabei sind die Unterschiede bei der Holzrahmenwand deutlich stärker ausgeprägt als bei der BSP-Wand. Im Frequenzbereich unter 500 Hz werden mit der offenen Fassade in einigen Terzen hingegen bessere Schalldämm-Maße erreicht als mit der geschlossenen Fassade. Der Grund hierfür dürfte in den unterschiedlichen Eigenfrequenzen der Fassaden liegen, worauf Schwingungsmessungen mittels Laser-Doppler-Vibrometer hindeuten.

Wie die Legende der linken Grafik in Abb. 1 zeigt, wurde mit der offenen Fassade auf einer Holzrahmenwand ein R_w-Wert von lediglich 38 dB erreicht. Um damit beispielsweise die österreichische Mindestanforderung von R_w = 43 dB zu erreichen sind innenseitig jedenfalls Zusatzmaßnahmen notwendig (z. B. eine 60 mm Lattung mit 2 x 12,5 mm GKF oder besser Federschienen mit 2 x 18 mm GKF, vgl. [4]). Auch bei der geschlossenen Fassade auf der Holzrahmenwand sollte innenseitig zumindest noch eine, besser zwei Lagen GKF aufgebracht werden. Die BSP-Wände schneiden bei beiden Fassadenarten deutlich besser ab, wobei die offene Fassade tieffrequent Vorteile mit sich bringt, was auch die $R_w+C_{50\text{-}5000}$ und $R_w+C_{tr,50\text{-}5000}$ Werte in der Legende der rechten Grafik verdeutlichen. Anzumerken ist hierbei, dass bei den BSP-Wänden auf der Dämmebene lediglich eine Fassadenbahn aufgebracht war. Wird auf der Dämmebene eine MDF oder ein anderer Plattenwerkstoff aufgebracht, ändert sich auch das bauakustische Verhalten der Wand. Die Daten der BSP-Wände sind somit nicht 1:1 auf Varianten mit Plattenwerkstoffen im Hinterlüftungsspalt übertragbar.

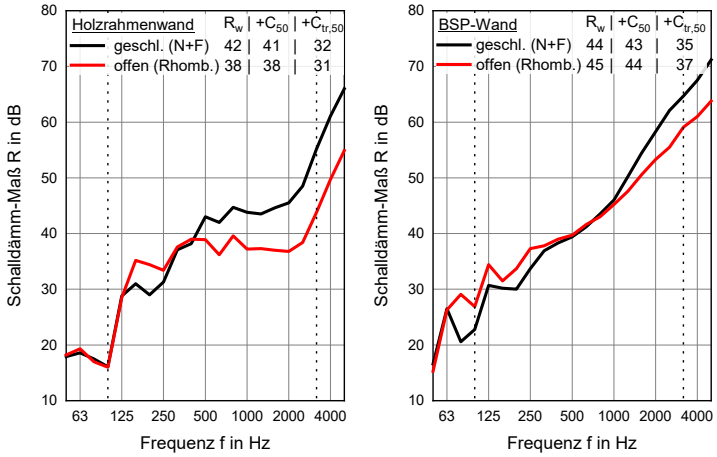


Abbildung 1: Einfluss der Fassadenart, geschl. (N+F): geschlossene Fassade mit Nut+Feder-Bretter; offen (Rhomb.): offene Fassade mit Rhombusleisten Links: Holzrahmenwand, Rechts: BSP-Wand; Einzahlkennwerte R_w, $R_w + C_{50\text{-}5000}$ und $R_w + C_{tr,50\text{-}5000}$ in dB in den Legenden

2.3. Einfluss Verschraubung

Wird die Unterkonstruktion der Fassade stark an die Grundwand gepresst, so führt dies zu einer deutlichen Körperschallübertragung im mittel- und hochfrequenten Bereich und somit zu einer reduzierten Schalldämmung der Wand. Durch die Verwendung von Vollgewindeschrauben anstelle von Teilgewindeschrauben wird ein zu hoher Anpressdruck an

die Grundwand verhindert, was der Schalldämmung zugutekommt. Vor allem bei der offenen horizontalen Fassade mit direkt auf der Grundwand verschraubter Traglattung haben sich hier Vorteile gezeigt, wie Abb. 2 am Beispiel der BSP-Wand verdeutlicht. Bei der geschlossenen vertikalen Fassade mit besser entkoppelter Kreuzlattung war der Einfluss der Verschraubung geringer ausgeprägt.

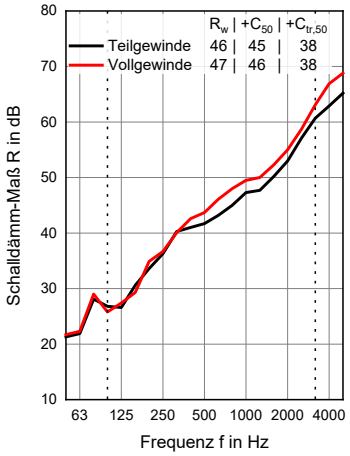


Abbildung 2: Einfluss der Verschraubung der Traglattung bei der offenen vertikalen Fassade auf der BSP-Wand, Einzahlkennwerte R_w, $R_w + C_{50\text{-}5000}$ und $R_w + C_{tr,50\text{-}5000}$ in dB in der Legende

Neben der Verschraubung mit der Grundwand hat bei einer Kreuzlattung auch die Lage und Verschraubung der Traglattung einen Einfluss auf die Schalldämmung der Außenwand. Wird die Traglattung nicht neben, sondern zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung angebracht, so erhöht sich die Schalldämmung der Außenwand im mittleren Frequenzbereich um bis zu 4 dB, der R_w-Wert verbesserte sich dadurch um 1 dB. Wichtig (!) ist hierbei jedoch, dass die Traglattung nur mit der Konterlattung verschraubt wird und nicht mit der Grundwand, da sich ansonsten die Anzahl der Schallbrücken zur Grundwand erhöht. Abb. 3 zeigt, wie solche zusätzlichen Schallbrücken die Schalldämmung der Wand zwischen 250 Hz und 2000 Hz deutlich verschlechtern. Kann nicht sichergestellt werden, dass die Traglattung lediglich in der Konterlattung verankert wird (und diese Verschraubung statisch ausreicht → ggf. dickere Konterlattung wählen), sollte die Traglattung möglichst direkt neben den Verschraubungspunkten der Konterlattung platziert werden. Generell gilt aus bauakustischer Sicht, je weniger Verschraubungen der Fassade mit der Grundwand desto besser.

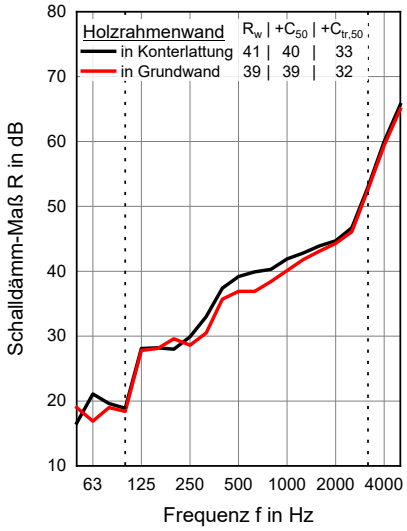


Abbildung 3: Einfluss der Verschraubungstiefe der horizontalen Traglattung (Traglattung zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung) bei geschlossener Fassade (vgl. Abb. 5 rechts)

2.4. Einfluss Lattungsebene

Die Orientierung der Fassadenschalung bestimmt im Allgemeinen ob die Unterkonstruktion aus einer einfachen (nur Traglattung) oder einer doppelten Lattungsebene (Kreuzlattung) besteht. Eine Kreuzlattung hat dabei – ähnlich zum oben gezeigten Einfluss der Schraubenart – den bauakustischen Vorteil, dass die Kopplung zwischen der Fassadenschalung und der Grundwand verringert wird. Abb. 4 zeigt, wie sich die Schalldämmung ändert, wenn eine geschlossene Fassade mit einer Kreuzlattung anstelle einer reinen – auf die Steher geschraubten – Traglattung ausgeführt wird. Sowohl bei der Holzrahmen- wie auch bei der BSP-Wand zeigen sich durch die verbesserte Entkopplung mit der Kreuzlattung höhere Schalldämm-Maße im mittel- und hochfrequenten Bereich. Während bei der BSP-Wand eine Kreuzlattung auch im tiefen Frequenzbereich zu höheren Schalldämm-Maßen führt, zeigen sich bei der Holzrahmenwand mit einer Kreuzlattung geringere Schalldämm-Maße im tiefen Frequenzbereich. Der Grund hierfür kann noch nicht eindeutig benannt werden.

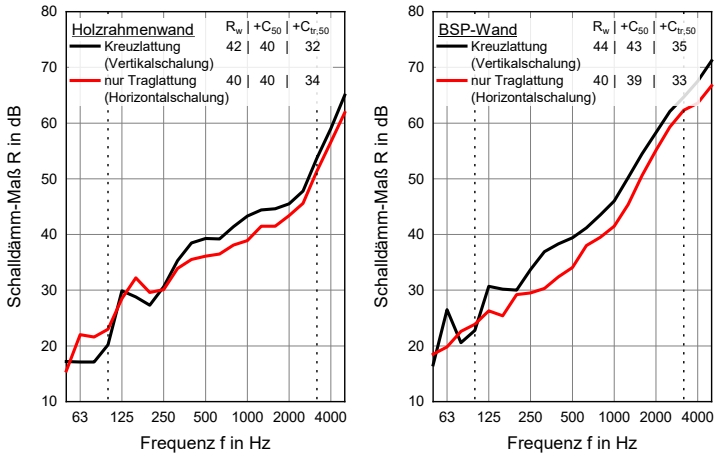


Abbildung 4: Einfluss der Variation der Unterkonstruktion bei geschlossener Fassade, links: Holzrahmenwand, rechts: BSP-Wand, Einzahlkennwerte R_w, $R_w + C_{50\text{-}5000}$ und $R_w + C_{tr,50\text{-}5000}$ in dB in der Legende

2.5. Resümee Unterkonstruktion

Wie sich gezeigt hat, wird die Schalldämmung einer Wand mit Holzfassade deutlich von der Ausführung der Fassadenunterkonstruktion beeinflusst. Um die Körperschallübertragung zwischen Fassade und Grundwand zu reduzieren, ist es sinnvoll stets eine Kreuzlattung auszuführen, wobei die Traglattung jeweils zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung anzuordnen ist. Zusätzlich ist auf die Verwendung der richtigen Schrauben(längen) zu achten. Abb. 5 verdeutlicht nochmals zusammenfassend die genannten Konstruktionsempfehlungen.

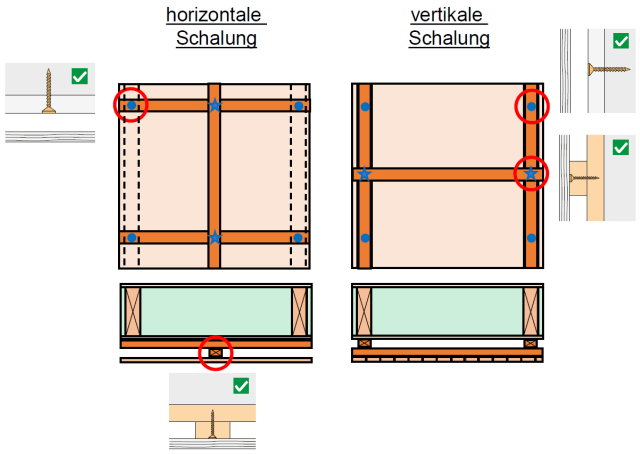


Abbildung 5: Konstruktionsempfehlungen zur Reduktion der Körperschallübertragung von der Fassade zur Grundwand – immer Kreuzlattung ausführen – Vollgewindeschrauben zur Verankerung der Konterlattung verwenden – Traglattung stets zwischen Verschraubungspunkten der Konterlattung anordnen – Traglattung nur in Konterlattung verankern (auf Statik achten, ggf. dickere Konterlattung wählen)

2.6. Optimierungsmaßnahmen

Im Forschungsprojekt wurden auch verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der Schalldämmung von Holzfassaden untersucht. Eine Methode, welche sowohl akustisch wie auch thermisch (siehe Teil 2 dieser Beitragsreihe) zu einer Verbesserung der Fassaden führte, war die Teildämmung der Trag- bzw. Konterlattungsebene. Hierfür wurde Mineralwolle so zwischen den Latten der Unterkonstruktion eingebracht, dass ein freier Lüftungsspalt von 30 mm Höhe erhalten blieb. Abb. 6 zeigt eine schematische Darstellung der mit Mineralwolle teilgedämmten Konterlattungsebene.

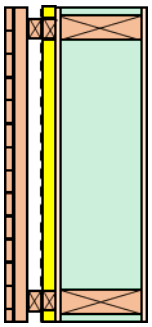


Abbildung 6: Darstellung der teilgedämmten Konterlattungsebene mit zweigeteilter Konterlattung und durchgehender Fassadenbahn (vgl. Abb. 5 rechts)

Sowohl bei einer offenen als auch einer geschlossenen Fassade wurde durch eine Teildämmung der Lattungsebene die Schalldämmung erhöht. Dabei war die Verbesserung bei der offenen Fassade deutlicher ausgeprägt als bei der geschlossenen Fassade. Abb. 7 zeigt die Schalldämm-Maße der beiden Fassadenvarianten auf einer Holzrahmenwand, zum einen mit ungedämmter 60 mm tiefer Trag- bzw. Konterlattungsebene und zum anderen mit 30 mm dicker Mineralwolle zwischen den Trag- bzw. Konterlatten. Wie zu erkennen ist, führt die Dämmung in der Unterkonstruktion bei der offenen Fassade im Frequenzbereich ≥ 500 Hz zu einem deutlichen Anstieg der Schalldämmung. Das zeigt sich ebenfalls in der Zunahme des R_w-Wertes um 4 dB. Bei der geschlossenen Fassade ist die Zunahme der Schalldämmung weniger deutlich, wobei hier eine Verbesserung bereits ab 125 Hz festzustellen ist. Nachdem die Trag- bzw. Konterlattung mit 120 mm ausgeführt und mit 90 mm Mineralwolle gedämmt wurde, konnte die Schalldämmung der offenen Fassade von R_w = 40 dB sogar auf R_w = 45 dB gesteigert werden. Bei der geschlossenen Fassade trat mit dieser Maßnahme eine Verbesserung von R_w = 43 dB auf R_w = 46 dB ein.
Soll eine teilgedämmte Lattungsebene umgesetzt werden, so ist eine Fassadenbahn auf dem Dämmstoff anzuordnen. Hier kann es sinnvoll sein, die Lattung über die Dicke zweiteilig auszuführen und so eine vollflächige Verlegung der Fassadenbahn auf der Teildämmung zu ermöglichen (vgl. Abb. 6).

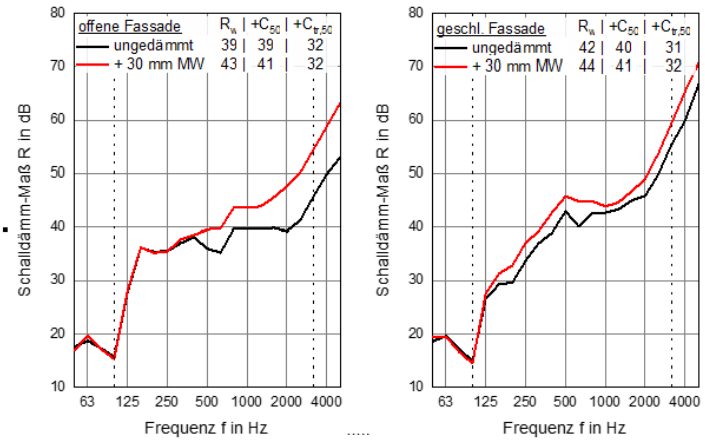


Abbildung 7: Einfluss einer 30 mm dicken Mineralwolledämmung (MW) zwischen den 60 mm tiefen Trag- bzw. Konterlatten (offene horizontale bzw. geschlossene vertikale Fassade) jeweils auf einer Holzrahmenwand, Einzahlkennwerte R_w, $R_w + C_{50\text{-}5000}$ und $R_w + C_{tr,50\text{-}5000}$ in dB in den Legenden

2.7. Zusammenfassung – Schallschutz

Aus den bauakustischen Untersuchungen im Projekt «Coole Hülle» können entsprechend den gezeigten Daten folgende praxisrelevante Erkenntnisse bzgl. Schallschutz abgeleitet werden:

- Geschlossene hinterlüftete Fassaden zeigen bei Holzrahmenwänden höhere Schalldämm-Maße als offene Fassaden.
- Fassaden sollten stets mit Kreuzlattung anstelle einer reinen Traglattung ausgeführt werden.
- Traglattung besser zwischen den Verschraubungspunkten der Konterlattung platzieren und nur in die Konterlattung schrauben (d. h. nicht bis in die Beplankung/den Steher schrauben, auf Statik achten, ggf. ist eine dickere Konterlattung notwendig).
- (Konter-)Lattungen sollten mit Vollgewindeschrauben anstelle von Teilgewinde-schrauben am tragenden Wandbildner befestigt werden.
- Eine Teildämmung der Unterkonstruktion kann die Schalldämmung der Wand deutlich erhöhen (Achtung, ausreichender Belüftungsspalt muss verbleiben).

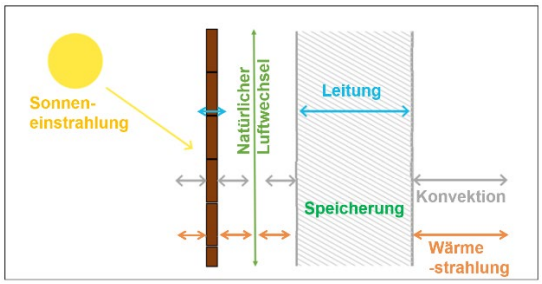
3. Wärmeschutz

3.1. Hintergrund

Wie stark sich der Innenraum aufgrund des Wärmestroms durch die Außenwände erwärmt, hängt u.a. von der Temperaturdifferenz zwischen der Außen- und Innenoberfläche der Wand ab. Durch eine Absenkung der Außenoberflächentemperatur kann, je nach U-Wert des Wandbildners, die Erwärmung des Raumes mehr oder weniger reduziert werden. Untersuchungen von [6] zeigen, dass der Wärmeeintrag in einen Wandbildner durch eine Hinterlüftung der Fassade um 82 % reduziert werden kann, was zu einem geringeren Wärmeeintrag in den Innenraum führt.
Die Temperatur im Belüftungsspalt einer hinterlüfteten Fassade wird primär von folgenden Faktoren bestimmt [7]:

- Strahlungsabsorption (Farbe) der Außenfläche
- Querschnitts des Belüftungsspalts
- Luftströmungsgeschwindigkeit im Belüftungsspalt

INFO
Prinzip Wärmeabfuhr im Hinterlüftungsspalt
Hinterlüftete Holzfassaden bieten gegenüber Putzfassaden unter anderem den Vorteil, dass ein Teil der solar eingebrachten Wärme durch den natürlichen Luftaustausch in der Fassade (Windwirkung, thermischer Auftrieb) abgeführt werden kann.



Die Abbildung (geändert nach [8]) verdeutlicht die Wärmeübertragungsvorgänge an Außenwänden. Durch gezielte Beeinflussung des Wärmemanagements einer hinterlüfteten Holzfassade (z.B. des konvektiven Wärmeabtransports) kann somit der Wärmestrom in den Innenraum im Vergleich zu WDVS-Putzfassaden reduziert werden.

3.2. Varianten und Messungen

Im Projekt «Coole Hülle» wurde der Einfluss der oben genannten Faktoren auf die Temperatur im Hinterlüftungsspalt – genauer gesagt auf die Oberflächentemperatur der Fassadenbahn im Hinterlüftungsspalt – messtechnisch untersucht.

Hierfür wurden am Forschungshaus der Holzforschung Austria verschiedene Fassadenvarianten auf einem einheitlichen Wandbildner (Holzrahmenbauweise, U ≈ 0,15 W/m²K) aufgebracht und konstruktiv wie auch farblich variiert (siehe Abb. 8).
Die beiden Standardfassaden bestanden zum einen aus einer unbehandelten, vertikalen Nut- und Feder-Lärchenschalung mit 3 cm Traglattung und 3 cm Konterlattung (d. h. 3 cm ungestörter Hinterlüftungsspalt) und zum anderen aus einer horizontalen Rhombusleistenschalung aus Lärche mit 3 cm Traglattung und einer dunklen Fassadenbahn. Im Zentrum der Untersuchungen standen die Fassadenvariationen entsprechend Tab. 2.



Abbildung 8: Forschungshaus der Holzforschung Austria mit den untersuchten Holzfassaden: Westfassade (giebelseitig; konstruktive Varianten) und Südfassade (Farbvariationen).

Tabelle 2: Wesentliche Variationen an den Fassaden.

Schalung	Hinterlüftungsspalt
- Orientierung (horizontal/ vertikal) - Spalt zwischen Schalungsbrettern - Farbe	-Tiefe - Öffnung (hinter-/belüftete/ stehende Luftschicht)

Zusätzlich zu den Temperaturen an verschiedenen Positionen im Bauteil und im Innenraum wurden relative Luftfeuchten und Luftströmungsgeschwindigkeiten im Hinterlüftungsspalt sowie diverse Wetterdaten am Forschungshaus erfasst. Nachfolgend wird primär die Temperatur an der Fassadenbahn diskutiert. Abb. 9 zeigt die unterschiedlichen Messpositionen im Hinterlüftungsspalt von verschiedenen untersuchten Varianten.

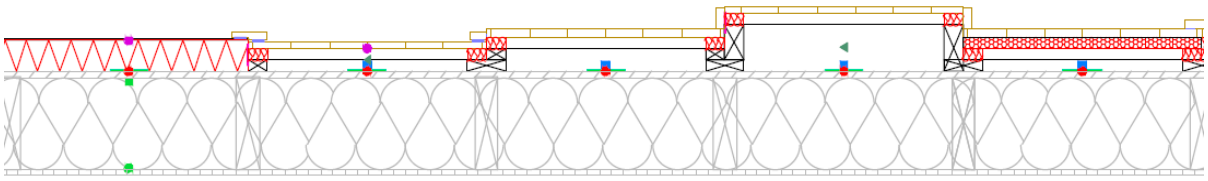


Abbildung 9: Horizontalschnitt durch Varianten mit Markierung der Messstellen (Farben und Formen sind Messstellencodes für Position und Sensortyp). Von links nach rechts: WDVS, hinterlüftete Fassaden mit je 3 cm Traglattung sowie 3 cm, 6 cm und 12 cm Konterlattung. Rechts: Zusatzdämmung auf Fassadenschalung.

3.3. Auswirkungen auf Oberflächentemperaturen

INFO

Definition offene, geschlossene, hinterlüftete und belüftete Fassade sowie «stehende Luftschicht»:

Eine hinterlüftete Fassade besitzt einen oben und unten geöffneten Hinterlüftungsspalt. Bei einer belüfteten Fassade hingegen ist die obere Öffnung verschlossen. Beide Öffnungen sind bei einer Fassade mit stehender Luftschicht verschlossen.
Als geschlossene Fassade wird eine hinterlüftete Fassade bezeichnet, deren Schalungsbretter (oder Plattenmaterialien) keinen Spalt zwischen den einzelnen Brettern aufweisen. Entsprechend wird als offene Fassade eine hinterlüftete Fassade bezeichnet, deren Schalungsbretter auf Spalt verlegt sind (in unserem Fall eine Rhombusschalung).

Die folgenden Grafiken zeigen die Temperaturen an der Fassadenbahn an drei exemplarischen Sommertagen im August (wolkenlos, hohe Außentemperatur und Sonneneinstrahlung). Anhand von Abb. 10 wird der Einfluss der Tiefe des Hinterlüftungsspalts bei geschlossenen Fassaden ersichtlich. Wie sich zeigt, führt ein aus versuchstechnischen Vergleichsgründen untersuchter dünner Spalt (1 cm Konterlattung → 1 cm Hinterlüftungsspalt) zu deutlich höheren Temperaturen auf der Fassadenbahn als die Standardvariante mit einer 3 cm dicken Konterlattung. Eine weitere Erhöhung der Konterlattungsdicke auf 6 cm führt nur zu leicht geringeren Temperaturen. Eine weitere Verdopplung der Konterlattungsdicke auf 12 cm zeigt quasi keinen nennenswerten Effekt mehr. Ein Hinterlüftungsspalt mit 3 cm scheint demnach ein guter Kompromiss zwischen Platzbedarf und sommerlicher Wärmeabfuhr zu sein.

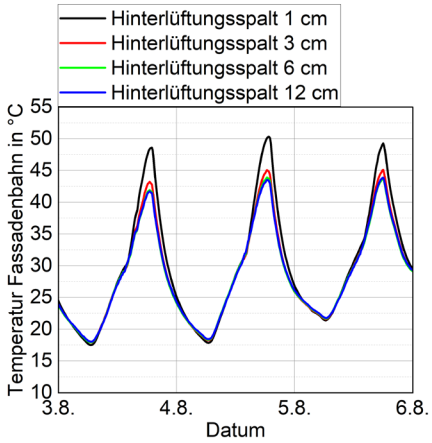


Abbildung 10: Einfluss der Tiefe des Hinterlüftungsspalts bei geschlossener Fassade.

Weitere Untersuchungen zeigen, dass ein Lüftungsgitter mit einem geringen Lochanteil (nur 10 % anstelle von 50 %) an den Zu- und Abluftöffnungen zu höheren Temperaturen auf der Fassadenbahn führt (+ 3,3 K). Ein Lochanteil von 50 % des Lüftungsgitters sollte deshalb nicht unterschritten werden. Zudem wurde deutlich, dass sowohl eine stehende Luftschicht als auch eine lediglich belüftete Fassade zu höheren Temperaturen auf der Fassadenbahn führt als eine hinterlüftete Fassade (Abb. 11). Neben der höheren feuchteschutztechnischen Robustheit sollte somit auch aus Gründen des sommerlichen Wärmeschutzes wenn möglich eine hinterlüftete Fassade ausgeführt werden.

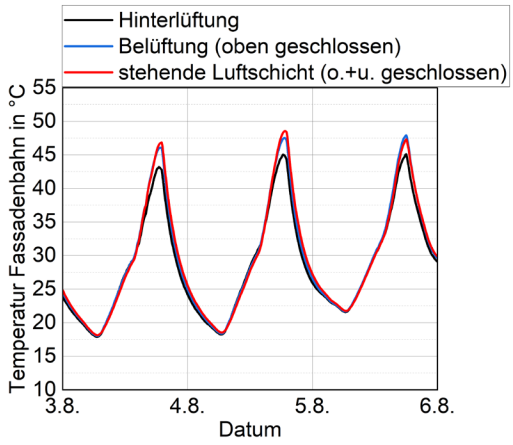


Abbildung 11: Einfluss der Ausführung der Hinterlüftungsebene (hinterlüftet/ belüftet/ stehende Luftschicht)

Wird die geschlossene Fassade in heller Farbgebung gehalten, werden reduzierte Temperaturen an der Fassadenbahn erreicht, während dunkle Farben zu deutlich erhöhten Temperaturen führen (Abb. 12links). Die Grafik zeigt ebenfalls, dass IR-reflektierende «coole Pigmente» bei einem schwarzen Fassadenanstrich nur eine geringfügige Wirkung haben. Abb. 12 rechts verdeutlicht den Einfluss der Farbgestaltung bei einer offenen Fassade. Auch hier ist zu erkennen, dass eine dunkle Farbgebung zu erhöhten Temperaturen führt, während helle Farben in etwas niedrigeren Temperaturen an der Fassadenbahn resultieren. Wird bei einer offenen Fassade eine weiße Fassadenbahn eingesetzt, beeinflusst diese die Temperaturen geringfügig positiv.

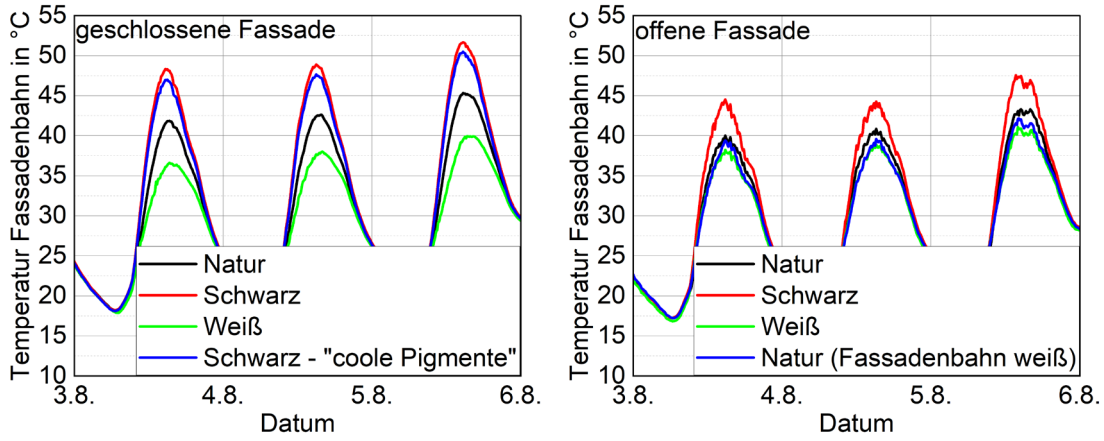


Abbildung 12: Einfluss der Fassadenfarbe, links: bei einer geschlossenen Lärchenfassade aus N+F-Bretter, rechts: bei einer offenen Lärchenfassade aus horizontalen Rhombusleisten (Spaltbreite 14 mm)

Vergleicht man beide Fassadenarten mit weißer Beschichtung miteinander (Abb. 12 links + rechts), wird deutlich, dass bei einer geschlossenen Fassade geringere Temperaturen auf der Fassadenbahn erreicht, werden als bei einer offenen, horizontalen Fassade. Dies resultiert aus der solaren Diffusstrahlung, welche bei einer offenen Fassade auf die (schwarze!) Fassadenbahn trifft.
Bei beiden Fassadenausführungen wird außerdem deutlich, dass eine schwarze Fassadenfarbe, im Vergleich zur naturfarbenen oder weißen Farbe, zu erhöhten Temperaturen an der Fassadenbahn führt. Bei einer geschlossenen Fassade ist dieser Effekt aufgrund des geringeren Luftaustauschs deutlich stärker ausgeprägt als bei einer offenen Fassade mit entsprechend höherem Luftaustausch. Daher sind vor allem bei dunklen Fassadenfarben aus Sicht des sommerlichen Wärmeschutzes offene horizontale Fassaden den geschlossenen Fassaden vorzuziehen.
Werden helle Fassadenbeschichtungen eingesetzt, macht es hingegen kaum einen Unterschied, ob eine geschlossene Fassade oder eine offene horizontale Fassade umgesetzt wird. Eine helle Fassadenfarbe hat stets einen positiven Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz.

Abb. 13 verdeutlicht den Einfluss der Spaltbreite zwischen den horizontalen Rhombusleisten bei einer offenen Fassade. Die Temperaturspitzen im Tagesverlauf fallen umso höher aus, je größer der Spalt zwischen den Schalungsbrettern ausgeführt wurde. Der Grund dafür ist wiederum die Bilanz der auf die dunkle Fassadenbahn auftreffenden Diffusstrahlung, welche sich mit zunehmender Spaltbreite erhöht.
Die Grafik zeigt auch, dass eine senkrechte Ausführung der Rhombusleisten zu deutlich erhöhten Temperaturen auf der Fassadenbahn führen kann. Unter einem bestimmten Sonnenwinkel trifft die Direktstrahlung im Tagesverlauf unmittelbar auf die dunkle Fassadenbahn auf, wodurch diese Temperaturspitzen hervorgerufen werden.
Wenn möglich sollten Rhombusprofile daher mit nach vorne und unten gerichteter, waagerechter Fugenöffnung und einer Spaltbreite zwischen den Brettern von ~7 mm (bei ~10 % Fugenanteil an der Gesamtfläche) umgesetzt werden. Zur Reduktion des sommerlichen Wärmeeintrags ist eine waagerechte Ausführung der offenen Fassaden günstiger als eine senkrechte Ausführung.

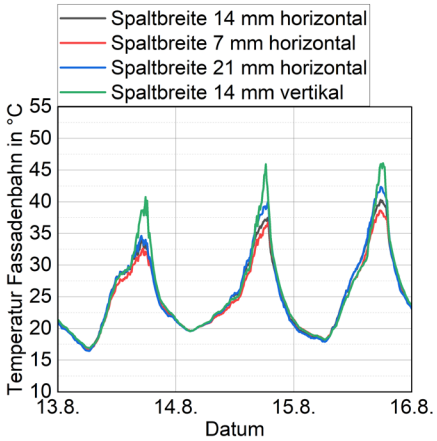


Abbildung 13: Einfluss der Spaltbreite zwischen den horizontalen Rhombusleisten und der Spaltorientierung

3.4. Einfluss Zusatzdämmung auf Fassadenschirm

Entsprechend den Schalluntersuchungen oben wurde auch bei den Untersuchungen im Forschungshaus ein Dämmstoff (Mineralfaser) im Hinterlüftungsspalt eingebracht. In diesem Fall direkt auf der Fassadenschalung. In Ergänzung dazu wurde auch der Effekt von Gipsplatten mit PCM (Phase Changing Materials) direkt auf der Fassadenschalung untersucht. Abb. 14 zeigt, dass sowohl der Dämmstoff wie auch die Gipsplatten mit PCM auf der Schalung zu deutlich geringeren Temperaturspitzen auf der Fassadenbahn führen. Weiterführende Untersuchungen haben gezeigt, dass der Dämmstoff sogar noch etwas effektiver ist, wenn dieser nicht auf der Fassadenschalung, sondern unter der Fassadenbahn (auf der Außenbeplankung) angebracht wird. Aufgrund der Wärmespeicherkapazität der Außenbeplankung wirkt der Dämmstoff unter der Fassadenbahn besser als eine Erhöhung der Dämmstoffdicke im Gefach. Die Variante mit PCM-Platten zeigt eine noch deutlichere Reduktion der Temperatur auf der Fassadenbahn. Derartige Platten sind derzeit für einen Einsatz im Freien nicht freigegeben und wohl auch noch etwas zu kostspielig.

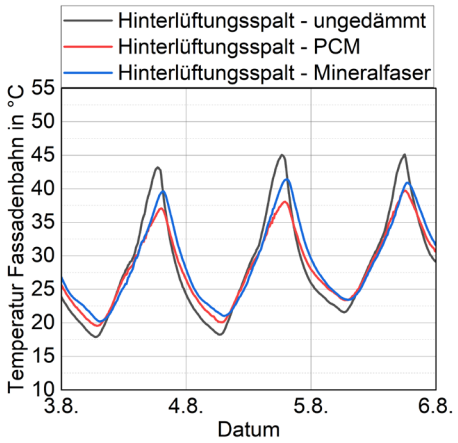


Abbildung 14: Einfluss von Dämmstoff (Mineralfaser) und Gipsplatten mit PCM (Phase Changing Materials) auf der Fassadenschalung im Hinterlüftungsspalt (3 cm Traglattung, 3 cm Konterlattung)

3.5. Untersuchungen zur Alterung von Holzoberflächen

Ergänzend zu den Temperaturmessungen wurden Untersuchungen zur Alterung (durch Freilandlagerung und Schnellbewitterung) unterschiedlicher Holzarten durchgeführt. Dabei ist bei allen untersuchten natürlichen Holzoberflächen ein deutlicher Anstieg der solaren Absorption festzustellen (Abb. 15). Die Alterung von unbehandeltem Holz führt zu einem solaren Absorptionsgrad der im Bereich einer dunklen Oberfläche liegt (Messwert schwarze Fassadenbeschichtung: a = 0,92).

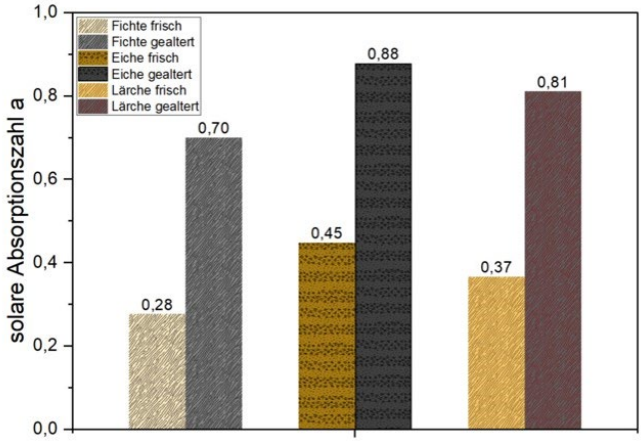


Abbildung 15: Solare Absorptionszahl a von frischen und gealterten Hölzern

3.6. Auswirkungen auf Wärmeströme

Mit Hilfe von vorab validierten hygrothermischen Simulationen wurde im Projekt ebenfalls untersucht, wie sich die Wärmeströme durch Außenwände mit unterschiedlichen Fassaden bei aktuellem Außenklima und bei einem für 2050 prognostizierten Außenklima (Klimaszenario gemäß RCP 8.5) für Wien entwickeln.
Abb. 16 zeigt die sommerlichen und winterlichen Wärmeströme sowie die Gesamtbilanz über ein Jahr durch einen m² einer Westwand (U-Wert = 0,15 W/m²K) mit einer geschlossenen hinterlüfteten Fassade und unterschiedlichen Außenbeschichtungen, jeweils für das Jahr 2023 und 2050. Zur Berechnung der Wärmeströme wurden die jeweiligen positiven Effekte (Winter: tagsüber Aufheizen; Sommer: nächtliche Abkühlung) mitberücksichtigt. Wie für das Jahr 2023 zu erkennen ist, kommt es durch eine weiße Fassadenbeschichtung im Sommer zu einem negativen Wärmeeintrag in den Raum. Das bedeutet, dass der Wärmeeintrag tagsüber geringer ausfällt als die Wärmeabgabe über Nacht. Die weiße Fassadenbeschichtung weist im Winter aufgrund der reduzierten solaren Erwärmung jedoch auch den höchsten Wärmeverlust auf. Bei einer schwarzen Fassade ist der sommerliche Wärmeeintrag hingegen ausgeprägter, dafür aber auch die winterlichen Wärmeverluste geringfügiger.

Werden nun die Gesamtbilanzen der weißen und schwarzen Fassade betrachtet, so zeigt sich, dass der Nettoenergiebedarf durch die schwarze Fassade etwas über jenem der weißen Fassade liegt. Die geringen ausfallenden Wärmeverluste der schwarzen Fassade während der Heizphase werden durch erhöhte Wärmeeinträge während der Kühlphase weitgehend aufgehoben. Die Daten verdeutlichen, dass bei einer schwarzen Fassade im Winter zwar etwas weniger geheizt werden muss, im Sommer dafür aber eher eine aktive Klimatisierung notwendig werden kann. Aufgrund der Klimaentwicklung wird 2050 die Wirksamkeit der nächtlichen Kühlung insbesondere in Städten deutlich abnehmen, sodass die sommerlichen Nachteile einer schwarzen Fassade noch stärker und die winterlichen Vorteile in Summe noch weniger zum Tragen kommen.
Die Wärmeströme durch eine Fassade mit naturfarbener, ungealteter Lärche liegen in etwa zwischen jenen einer weißen und einer schwarzen Fassade. Bei einer vergrauten bzw. gealterten Holzoberfläche werden sich die Wärmeströme jedoch aufgrund des dadurch zunehmenden solaren Absorptionsgrades in Richtung der schwarzen Fassade orientieren.

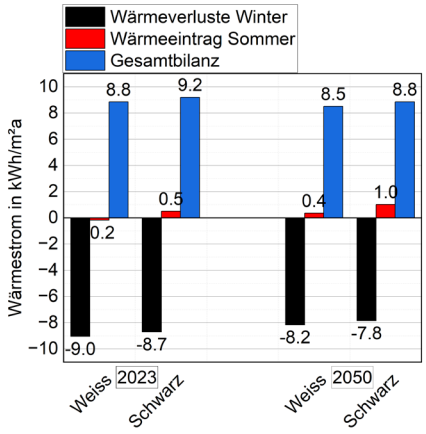


Abbildung 16: Wärmeströme durch eine 1 m²-Westwand (U-Wert = 0,15 W/m².K) mit weißer und schwarzer geschlossener, hinterlüfteter Fassade in den Jahren 2023 und 2050 in Wien.

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der thermischen Fassadensimulation ist, dass bei ausreichendem Luftaustausch im Hinterlüftungsspalt die Wärmeübertragung von der Fassadenschalung auf die Fassadenbahn primär durch langwellige Wärmestrahlung stattfindet. Orientierende Simulationen haben aufgezeigt, dass durch eine Unterbindung dieses Wärmetransportvorgangs die sommerlichen Wärmeeinträge unabhängig von der Holzfassadenfarbe auf das Niveau einer weiß beschichteten Holzfassade reduziert, werden könnten. Ein innovativer und praktisch umsetzbarer Einsatz von Materialien oder Oberflächenbeschichtungen mit sehr geringer langwelliger Wärmeemission auf der Schalungsinnenseite bzw. mit geringer langwelliger Strahlungsabsorption auf der Fassadenbahnseite könnte daher in Bezug auf den sommerlichen Wärmeeintrag zu optimalen Ergebnissen führen.

3.7. Handlungsempfehlungen – Wärmeschutz

Aus den thermischen Untersuchungen im Projekt «Coole Hülle» können entsprechend den gezeigten Ergebnissen folgende praxisrelevante Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Geschlossene Fassaden mit einer Hinterlüftung, nicht mit einer Belüftung oder einer stehenden Luftschicht ausführen
- Hinterlüftungsspalt von mind. 3 cm an der engsten Stelle einplanen
- Zu- und Abluftöffnungen mit freiem Querschnitt von mind. 150 cm²/lfm – ggf. anpassen an Lochanteil des Lüftungsgitters (mind. 50 % Lochanteil)
- Helle Beschichtungen erwärmen die Fassaden weniger
- Unbehandeltes vergrautes Holz erwärmt sich ähnlich stark wie eine dunkel beschichtete Oberfläche. Wenn möglich, sollte bei unbehandeltem Holz eine offene Fassade gewählt werden
- Fassadenbahn bei offenen Fassaden möglichst beschatten, z.B. durch horizontale Rhombusprofile mit einer maximalen Fugenbreite von 7 mm -10 mm

4. Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) für die Förderung und folgenden Projektpartnern für die Unterstützung des Projekts Coole Hülle: Bundesgremium Baustoff-, Eisen und Holzhandel, Bundesinnung Holzbau, Fachverband der Holzindustrie Österreichs – Fachgruppe Bau und Fachgruppe Laubholz, Österreichischer Fertighausverband, Verband der Europäischen Hobelindustrie, ARWAG Wohnpark Errichtungs-, Vermietungs- und Beteiligungsgesellschaft m.b.H., Getzner Werkstoffe GmbH, J. u. A. Frischeis GmbH, MIGRA Gemeinnützige Wohnungsges.m.b.H., Osmo Holz und Color GmbH & Co KG, Saint-Gobain Rigips Austria GesmbH, SHIGA GmbH, Stora Enso WP Bad St. Leonhard GmbH, Weiss GmbH, Weissenseer Holz-System-Bau GmbH

5. Literatur

[1] *Nusser, B.; Lux, C.; Stenitzer, A.:* Holzfassaden im Fokus – Teil 1: Schallschutz. *In:* Holzbau – die neue Quadriga, Heft 5, 2023, S. 46-49.

[2] *Schumacher, M.; Tieben, J.; Nusser, B.:* Holzfassaden im Fokus – Teil 2: Wärmeschutz. *In:* Holzbau – die neue Quadriga, Heft 6, 2023, S. 43-46.

[3] *Koch, C.; Felhofer, M.; Fürhapper, C.:* Holzfassaden im Fokus – Teil 3: Feuchteresistenz. *In:* Holzbau – die neue Quadriga, Heft 1, 2024, S. 50-53.

[4] *Nusser, B.; Lux, C.; Ferk, H.:* Schalldämmung von Außenwänden im Holzbau – Teil 1: Holzrahmenbauweise. *In:* Holzbau – die neue Quadriga (2020), Heft 4, S. 43-47.

[5] *Ferk, H.; Leh, C.; Mosing, M. et al.:* Schalldämmung von Außenwänden im Holzbau – Teil 2: Holzmassivbauweise. *In:* Holzbau – die neue Quadriga (2020), Heft 5, S. 46-51.

[6] *Künzel, H.; Mayer, E.:* Einfluß der Hinterlüftung leichter Außenwände auf den sommerlichen Wärmeschutz. IBP-Mitteilung 50, Fraunhofer Institut für Bauphysik, 1979.

[7] *Liersch, K.W.:* Vorhangfassaden – Bauphysikalische Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes, Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen Heft 1, Bauverlag, Wiesbaden, 1981.

[8] *Treberspurg, M.; Österreicher, D.; Inigo, C.V.:* Hitze! vermeiden – Vermeidung sommerlicher Überwärmung im Wohnbau – Technologieleitfaden Sommerliche Überwärmung. Universität für Bodenkultur Wien – Department für Bautechnik und Naturgefahren, Institut für konstruktiven Ingenieursbau, 2018.

Renvelope: Energy Adaptive Shell – serielle CO_2-neutrale Gebäudesanierung

DI Dr. Tobias Weiss
Bereichsleiter, Bereich - Gebäude
AEE – Institut für Nachhaltige Technologien
Gleisdorf, Österreich



Renvelope: Energy Adaptive Shell – serielle CO_2-neutrale Gebäudesanierung

1. Gebäudebestand: Herausforderungen

In den letzten zwei Jahrzehnten hat die bebaute Fläche weltweit um erstaunliche 65 Prozent zugenommen und wird voraussichtlich im Jahr 2020 fast 245 Milliarden Quadratmeter erreichen. Gleichzeitig ist der durchschnittliche Energieverbrauch pro Quadratmeter nur um etwa 25 Prozent gesunken, was darauf hindeutet, dass die Fortschritte bei der Sanierung und Energieeffizienz das Wachstum der Nutzfläche nur teilweise ausgeglichen haben.

Der Gebäudesektor bleibt daher nach wie vor von entscheidender Bedeutung, um die Klimaziele zu erreichen. In den Jahren von 2005 bis 2014 gab es im Gebäudesektor durchaus Erfolge mit einer Reduktion von Treibhausgasemissionen um 40 Prozent.[1] Seitdem stagnieren diese Fortschritte jedoch. Gemäß den Zielen der EU-Initiative «Fit-for-55» müssen bis 2030 jedoch drastische Emissionsreduktionen erreicht werden, um die Halbierung zu schaffen.[2]

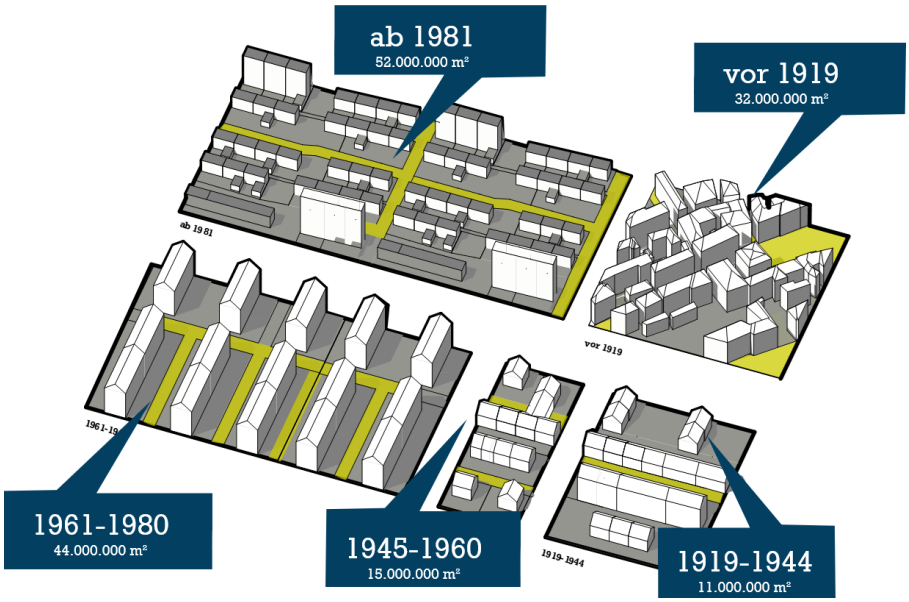


Abbildung 1: m² Wohnnutzfläche großvolumiger Wohngebäude in Österreich (Quelle Tobias Weiss, AEE INTEC)

Die Sanierung des Gebäudebestands steht also vor einer gewaltigen Herausforderung: Wie kann der großteils fossil versorgte und teilweise sanierte Gebäudebestand effizienter auf dekarbonisierbare Energieversorgungssysteme umgestellt werden?

Der Weg zur kohlenstofffreien Beheizung und Kühlung im Gebäudesektor ähnelt dem Wandel im Automobilsektor:

1. Verringerung des Energieeinsatzes pro versorgter Einheit.
2. Elektrifizierung dessen, was möglich ist, und Abschaffung der fossilen Verbrennung für Energieversorgung.
3. Entwicklung sauberer Brennstoffe für alle anderen Anwendungen, die hohe Temperaturen erfordern.

[1] Quelle: IEA Tracking Report – Buildings; C. Delmastro; 2022
[2] Fit for 55 package under the European Green Deal. Europäisches Parlament, abgerufen am 24. Juli 2021

Neben den Verbesserungen an der Gebäudehülle hängt die Wahl zwischen der Umstellung der Raumheizsysteme auf Fernwärme und Wärmepumpensystemen von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Verfügbarkeit von Fernwärme, der Zustand der Gebäudehülle und bereits durchgeführte Teilsanierungen.

Das wichtigste Ziel im Einklang mit den Klimazielen ist natürlich die umfassende hochqualitative Sanierung des Gebäudebestands auf Niedrigstenergie-Niveau. Sollte das nicht in einem Schritt möglich sein, dann bietet sich eine stufenweise, einem «Sanierungsfahrplan» oder «Sanierungskonzept» folgende Sanierung eines Gebäudes oder Quartiers an. Als erste pragmatische und kurzfristige Maßnahme können Teile der Gebäudehülle so verbessert werden, dass die Wärmeabgabe in den Räumen auf Niedertemperatur (Senkung der Vorlauftemperatur auf unter 50°C) umgestellt werden kann. Dazu sind die Erhöhung von Wärmeabgabeflächen und die rasche Umsetzung kostengünstiger Maßnahmen wie die Dämmung der Kellerdecke, der obersten Geschossdecke und (wenn nicht wie bei den meisten Nachkriegsgebäuden ohnehin schon geschehen) der Sanierung der Fenster förderlich. Denn Niedertemperaturwärme und -kälte lassen sich sinnvoll in großem Maßstab aus erneuerbaren Quellen gewinnen, beispielsweise mittels Wärmepumpen in Kombination mit effizienten Quellen wie dem Erdreich.

Folgend dem zuvor ausgearbeitetem Stufen- bzw. Sanierungsplan können weitere Maßnahmen in Abstimmung dazu später folgen.

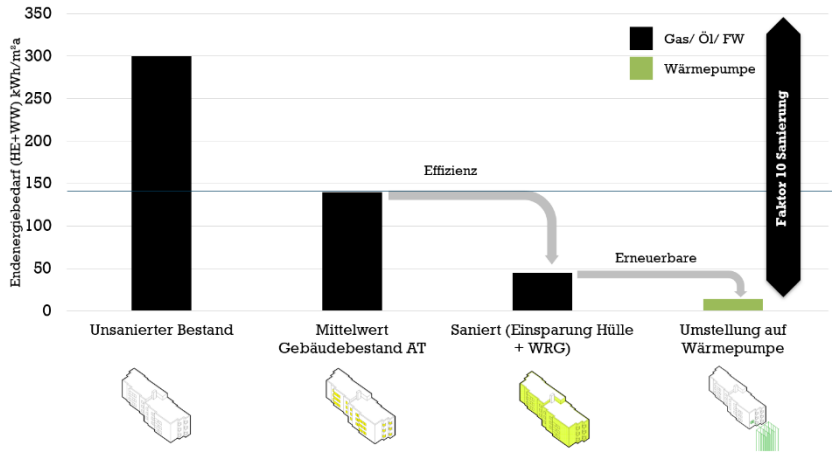


Abbildung 2: State of the Art: «Faktor 10 Sanierung» (Quelle Tobias Weiss, AEE INTEC)

2. CO_2 neutrale Wärmeversorgung von Bestandsgebäuden

Die Umstellung auf Fernwärme ist oft die technisch einfachste und über den Lebenszyklus gerechnet kosteneffizienteste Lösung, sofern diese verfügbar ist. Der optimale Zeitpunkt für eine umfassende Hüllsanierung unterscheidet sich in der Regel von dem Zeitpunkt, an dem die Umstellung auf Fernwärme oder Wärmepumpen erfolgen sollte. Dies ergibt sich aus den unterschiedlichen technischen, organisatorischen oder finanziellen Voraussetzungen oder den bereits durchgeführten bautechnischen Teilsanierungsmaßnahmen.

In Gebäuden, in denen die Raumheizung und/oder Warmwasserversorgung derzeit noch dezentral erfolgt und kein Fernwärmeanschluss möglich ist, bieten im urbanen Bereich Wärmepumpen mit Tiefensonden als Wärmequelle eine wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Alternative. Dies erfordert jedoch Platz für Sondenfelder und die Regenerierung des Erdreichs durch erneuerbare Energiequellen wie Solarthermie, wenn der Wärmebedarf den Kühlbedarf über das Jahr übersteigt, was üblicherweise bei Wohngebäuden der Fall ist. Geothermisch versorgte Wärmepumpen sind zwar in der Errichtung teurer, über einen Zeitraum von 20 Jahren und mehr aber technisch, ökologisch und ökonomisch vorteilhafter als Luftwärmepumpen und eine robuste dauerhafte Lösung für die langfristige Wärmeversorgung von Immobilien.

Aufgrund der bereits heute guten Wirtschaftlichkeit bieten hier Contractinglösungen eine sinnvolle Möglichkeit, die berechneten Kosteneinsparungen im Betrieb von Raumheizungs- und Warmwassersystemen zu realisieren und die Risiken der Betriebsführung zu minimieren. Diese Lösungen können oft auch bei Teilsanierungen genutzt werden, da bereits durchgeführte Maßnahmen in der Gebäudehülle und die Kompaktheit der Baukörper die bestehenden Heizkörper ausreichend effizient machen. Die Umstellung auf Wärmepumpen erfordert jedoch eine sorgfältige Planung und ist nur im Rahmen einer Gesamtsanierungsstrategie über einen längeren Zeitraum sinnvoll.

3. Knackpunkt Zentrale Wärmeverteilung für die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung von Mehrgeschoßigen Wohngebäuden

Schritt 1: Umstellung von dezentralen Einzellösungen auf zentrale Lösungen – Eine der grundlegenden Herausforderungen bei der Umstellung auf eine nachhaltige Gebäudewärmeversorgung besteht darin, dezentrale Einzellösungen in zentrale Systeme zu integrieren. Dieser erste Schritt erfordert eine sorgfältige Planung und Durchführung, um sicherzustellen, dass die Umstellung möglichst geringfügige Eingriffe in die Wohnungen der Bewohner erfordert. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, besteht darin, das vorhandene zentrale Verteilersystem zu nutzen, wenn es noch in gutem Zustand ist. Dies ermöglicht eine relativ reibungslose Umstellung, da die Hauptinfrastruktur bereits vorhanden ist. Wenn das bestehende System jedoch nicht mehr verwendbar ist, kann die Verlegung von Leitungen im Treppenhaus oder in der Fassade eine praktikable Lösung sein. Dies erfordert zwar eine gewisse bauliche Intervention, minimiert jedoch die Störungen für die Bewohner.

Schritt 2: Integration neuer Wärmepumpen und Trinkwassererwärmungslösungen – Nach der erfolgreichen Umstellung auf zentrale Wärmeverteilungssysteme ist der nächste Schritt die Integration effizienter Wärmepumpen. Diese können im Dachboden oder im Technikraum im Keller installiert werden. Für die Trinkwassererwärmung stehen verschiedene Optionen zur Verfügung, darunter dezentrale Lösungen und semizentrale Lösungen mit Booster-Wärmepumpen oder E-Boilern. Diese Systeme sind effizient und können den Bedarf an konventionellen Heizmethoden reduzieren.

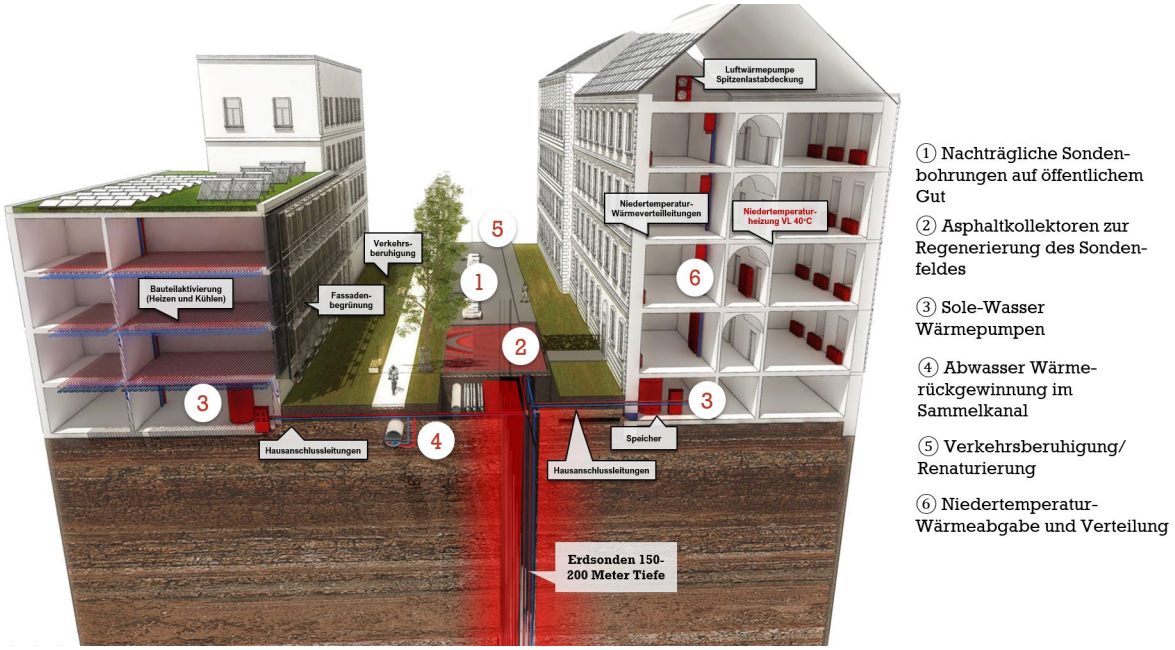


Abbildung 3: CO_2 neutrale Wärmeversorgung – Umbau der bestehenden städtischen Infrastruktur (Quelle Tobias Weiss, AEE INTEC)

4. Gebäudesanierung im Wandel: Von den Prototypen zu Seriellen Lösungen im Holzbau

Noch immer stehen Architekt:innen, Ingenieur:innen, Bauunternehmer:innen und Gebäudeeigentümer:innen und Hausverwaltungen vor der Herausforderung, für jedes Sanierungsprojekt individuelle Lösungen entwickeln zu müssen. Doch oft bleiben die erarbeiteten Erkenntnisse auf der Strecke, sobald das Projekt abgeschlossen ist. Jede Gebäudesanierung wird somit zu einem Prototyp, und die «Bauindustrie» ist keine Industrie, die standardisierte Lösungen herstellt. Kein Sanierungsprojekt gleicht dem anderen, trotz immer gleicher Fragestellungen in der Planung und Schnittstellenproblematiken in der Ausführung; viel Potenzial für Optimierungen bleibt ungenutzt.

Die herkömmliche Sanierungspraxis	**Serielle Sanierungslösungen / Out-of-the-box Systemlösungskonzepte**

• Arbeiten für übliche Sanierungsprozesse und Techniken sind sehr zeitintensiv und erfordern monatelange Arbeiten vor Ort inkl. bzw. sogar zwischenzeitliche Aussiedelungen der Bewohner:innen.
• Risiko in Bezug auf Umsetzungsqualität und Energieeinsparung für die Eigentümer:innen
  • Bei jedem Projekt wird eine neue Lieferkette aufgebaut
  • Ein erheblicher Anteil der Sanierungsarbeit entfällt auf Nacharbeiten von Fehlern, was Zeit und Geld kostet;etwa 14% des Umsatzes werden für die Behebung von Fehlern aufgewendet
  • Die Produktivitätszeiten liegen oft unter 50%
  • Baueinreichungsverfahren sind langwierig und müssen aufgrund fehlender Standardisierung umfassend von den Behörden geprüft werden
	• Statt Prototypen anzufertigen, wird auf Standardisierung gesetzt
	• Komplexität soll durch den Verzicht auf Sonderlösungen reduziert werden
	• Vereinfachte Behördenverfahren durch «Bautypengenehmigung»
	• Garantien für energetische Performance und Behaglichkeit können ein wichtiger Schritt in Richtung Warmmiete sein, um das Investoren-Nutzer:innen-Dilemma zu lösen
	• Pilotprojekte zeigen, dass hochwertige Sanierungen schnell und ohne große Störungen der Bewohner:innen umgesetzt werden können
	• Fehler können durch den Einsatz von BIM (Building Information Modeling), minimiert werden

5. Neue Ansätze aus Forschung und Entwicklung für standardisierte Sanierungen im Holzbau

AEE INTEC hat sich über viele Jahre hinweg gemeinsam mit Partner:innen intensiv an der Entwicklung von Technologien zur Seriellen Sanierung in Holzkonstruktion und der Integration von Sanierungskomponenten beteiligt. Zuerst wurden in Monitoring-Projekten mit den ersten Seriellen Sanierungen wie der Mittelschule Schwanenstadt oder dem Wohnbau in der Makartstraße in Linz sowie am Dieselweg Graz Erfahrungen gesammelt. Dann folgten vor etwa 15 Jahren erste internationale Austauschprojekte wie IEA ECBCS Annex 50 «Vorgefertigte Systeme zur Sanierung von Wohngebäuden» und das nationale Haus der Zukunft-Leitprojekt e80^3. Projekte wie SaLüH!, MultiTAB, HVAC via Facade, EXCESS, Inspire wurden dann ausgehend von niedrigen TRL-Stufen[3] begleitet und haben in diesem Bereich in den letzten Jahren wichtige Fortschritte erzielt und marktreife Produkte in Nischenmärkten hervorgebracht. Doch die Integration haustechnischer Anlagen in modularen Hüllelementen mit maximalem Vorfertigungsgrad hätte größeres Potenzial zur synergetischen Nutzung von haus- und gebäudetechnischer Sanierung. Es gibt zentrale Punkte, die bislang nicht ausreichend berücksichtigt wurden und die die Markteinführung behinderten.

Im Projekt **SaLüH! Gebäudetechnische Lösungen für die Sanierung von kleinen Wohnungen,** geleitet von der Universität Innsbruck, wurden standardisierte Konzepte der gebäudetechnischen Sanierung als Systemlösungsansätze erarbeitet, die von Wohnbaugesellschaften, Herstellern von Lüftungs- und Heizsystemen sowie Planungsbüros genutzt werden können.[4] Diese aufeinander abgestimmten Konzepte umfassen Wärmedämmung, Fenster, eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung sowie Heizung und Trinkwarmwasseraufbereitung durch Kleinstwärmepumpen. Sie sind kostengünstig, einfach zu installieren und können schrittweise (Wohnung für Wohnung) umgesetzt werden, wobei die Bewohner:innen möglichst wenig beeinträchtigt werden.

Projekte wie **MultiTAB, EXCESS, CEPA** haben die Beheizung von Bestandsgebäuden durch Bauteilaktivierung von außen durch die Aktivierung massiver Bestandswände vorangebracht. Ein Vorteil der aktiven Energiefassade, wie sie derzeit am TAGGER-Areal in Graz demonstriert wird, ist es, dass sie Gebäude und Wände als thermische Speicher nutzbar macht. Durch diese Bauteilaktivierung wird es möglich, fluktuierenden Wind- oder Solarstrom genau dann in Wärmepumpen zu nutzen, wenn er in großen Mengen verfügbar ist. Die maximale Speicherkapazität des Gebäudes durch diese Art der von bauteilaktivierten Gebäuden kann im Vergleich zu ähnlichen Gebäuden mit Radiatorheizungen um bis zum zehnfachen, durch Nutzung der thermischen Masse der Außenwände gesteigert werden. Dafür hat AEE INTEC mit TOWERN3000 die CEPA-Fassadentechnologie als eine Sanierungs-Komplettlösung für Dämmen, Heizen und Kühlen auf den Markt gebracht und patentiert.

[3] Der Technology Readiness Level (TRL), auf Deutsch als Technologie-Reifegrad übersetzt, ist eine Skala zur Bewertung des Entwicklungsstandes von neuen Technologien

[4] https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/salueh-sanierung-von-mehrfamilienhaeusern-mit-kleinen-wohnungen-kostenguenstige-technische-loesungsansaetze-fuer-lueftung-heizung-und-warmwasser.php



Abbildung 4: Die Fassade als Energiespeicher – CEPA (Quelle TOWERN 3000)

Kann Wärmeenergie direkt von der Fassade in den Raum geholt werden, etwa über eine in die Fassade integrierte Kleinstwärmepumpe? Im Projekt **HVAC VIA FACADE** wurden in die bestehende Brüstung bzw. in eine vorgehängte Holzleichtbau-Fassade modulare Split-Wärmepumpen integriert. Sie wurden für eine dezentrale Wärmeversorgung mit sehr kompakten und leisen fassadenintegrierten Außeneinheiten für Heizung und Trinkwarmwasserversorgung und optional Kühlung in Verbindung mit PV bis zum Prototyp entwickelt. In einem weiteren Schritt wurden vorgefertigte Fassadenelemente, die die gesamte Gebäudetechnik, d.h. PV, Heizung, Lüftung sowie Ver- und Entsorgungsstränge beinhalten, entwickelt. Der wesentliche Vorteil ist, dass für die Zentralisierung der Energieversorgung im Zuge der Sanierung nicht aufgestemmt werden muss und die Bewohnerinnen und Bewohner ihre Wohnungen während der Sanierung nicht verlassen müssen. Aber auch schallabsorbierende Fassaden und Oberflächen können eingesetzt werden, um schallharte Oberflächen im städtischen Raum zu reduzieren und damit zusammen mit dem künftigen elektrischen Verkehr die Schallbelastung generell zu vermindern.



Abbildung 5: HVAC VIA FACADE (Quelle AEE INTEC)

Das Leitprojekt **e80^3** hat gezeigt, dass es mit multiplizierbarer, hochwertiger Gebäudehülle möglich ist, über die Jahresbilanz Plus-Energie-Standard bei Sanierungen bis zu vier Geschoßen zu erreichen. Die Zutaten: Außenhülle mit Passivhauskomponenten, gleichzeitige Integration von energieerzeugenden Aktivelementen wie thermischen Solarkollektoren und PV sowie eine intelligente Steuerung und Netzinteraktion mit bestehenden Wärme und Stromnetzen. Mit der Seriellen Sanierung der Wohnhausanlage «Johann-Böhm-Straße 34/36» in Kapfenberg wurde erstmals in Österreich ein bestehendes Mehrfamilienhaus aus den 1960-er Jahren in ein nahezu Plus-Energie-Gebäude verwandelt.



Abbildung 6: E80^3 Sanierung Johann-Böhm Straße (Quelle AEE INTEC)

In den Projekten **SüdSan** und **smarteVeranda** sollen einige der oben angesprochen Technologielösungen im Maßstab der Quartiersebene in Arbeitersiedlungen mit insgesamt ca. 500 WE in Vorarlberg und der Steiermark etappenweise umgesetzt werden.

6. Ausblick: Standardisierung, Digitalisierung und Finanzierbarkeit

Ein wesentliches Hemmnis bei der Umsetzung von Seriellen Sanierungen bleibt trotz einer Vielzahl an bereits etablierten technischen Lösungen und neuen marktnahen Entwicklungen derzeit die Finanzierbarkeit der Maßnahmen bei vertretbaren Mieterhöhungen für die Bewohner:innen, vor allem im Sozialen Wohnbau. Mindestrücklagen sind notwendig, um die erforderlichen Sanierungen und Verbesserungen zu finanzieren. Auch scheitern viele Sanierungen trotz hoher Förderungen an hohen Zinsen und Baukosten, bestehenden Mietverträgen, die nur in geringem Ausmaß eine Erhöhung der Mietkosten durch die erzielten Energieeinsparungen und den verbesserten thermischen Komfort zulassen (Investoren-Nutzer:innen-Dilemma), und rücken umfassende Sanierungskonzepte oft in weite Ferne. Die Finanzierung dieser Kosten ist derzeit weder in Österreich noch in Europa zufriedenstellend geregelt.

Mit dem Leitprojekt **RENVELOPE** der Vorzeigeregion Energie soll nun gemeinsam mit Industriepartnern wie Rhomberg, Nussmüller Architekten und Towern3000 ein entscheidender Schritt zur Markteinführung und Finanzierbarkeit serieller Sanierungslösungen gesetzt werden. Im Zuge dieses Projektes werden drei Gebäude mit einer kosteneffizienten seriellen Komplettlösung, in Form einer vorgefertigten Außenhülle mit integrierter Gebäudetechnik modernisiert. Dies stellt einen Paradigmenwechsel gegenüber dem traditionellen Ansatz dar, bei dem die Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen im Inneren des Gebäudes untergebracht wurden. Drei großvolumige Gebäude werden dabei in Österreich mit diesem System seriell saniert: ein mehrgeschoßiges Wohngebäude der Sozialbau AG in Wien in der Arenbergasse, die Landesberufsschule in Knittelfeld verwaltet durch die LIG und ein weiteres Gebäude. Mit den drei Demonstratoren soll gezeigt werden, dass aus einer Vielzahl an prototypischen Einzellösungen ein Gesamtsystem für die CO_2-neutrale Gebäudesanierung mit vorgefertigten innovativen Fassaden- und Dachelementen kosten- und zeiteffektiv umgesetzt werden kann.

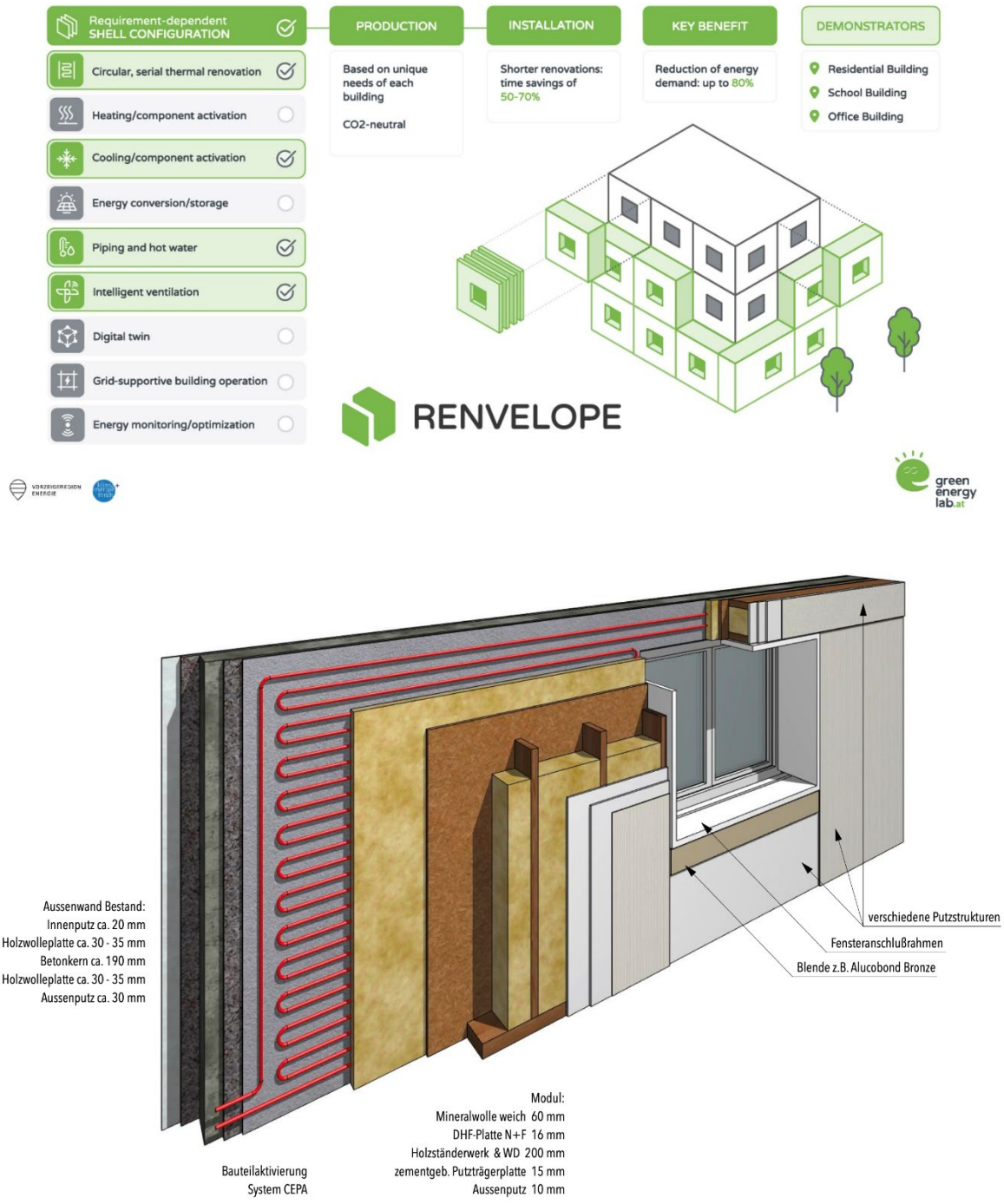


Abbildung 7: RENVELOPE – Vorzeigeregion Energie Bilquelle: Green Energy Lab

Gelingt es durch Digitalisierung, Standardisierung und Vorfertigung sowie Kosteneinsparung durch multifunktionale Bauteile, auch wirtschaftlich tragbare Konzepte für das Marktsegment der Mehrfamilienhäuser zu etablieren, so können diese in einem nächsten Schritt auf größere Gebäudeportfolios skaliert werden.

GEBÄUDE – technik | bauteile | materialien
BIM und KI in Bauphysik und Gebäudetechnik

Gebäude- und Anlagensimulation im Planungsprozess – Möglichkeiten mit OpenBIM

Elisabeth Eckstädt
Fraunhofer IIS/EAS
Dresden, Deutschland



Gebäude- und Anlagensimulation im Planungsprozess – Möglichkeiten mit OpenBIM

1. Simulation im Planungsprozess

1.1. Mehrwerte der Simulation im Planungsprozess

Simulationsbetrachtungen bieten im Vergleich zu (quasi)stationären thermischen Berechnungen, wie sie in vielen Normen (z.B. DIN EN 12831-1, DIN V 18599) vorgeschrieben sind, einen Reihe von Mehrwerten:

A. Genauere Berechung: Die statischen Berechnungsverfahren enthalten starke Vereinfachungen, die zu einer nennenswerten Überdimensionierung von Anlagen führen können. Damit einher gehen erhöhte Investitions- und Betriebskosten. Dies trifft beispielweise für die Heizlastberechnung zur Auslegung der zentralen Erzeuger und die Auslegung von Lüftungsregistern zu. Die Bewertung des Einflusses von schwankenden äußeren Faktoren z.B. Wetterbedingungen und intern aufgeprägten wechselnden Lasten ist nur mit Hilfe dynamischer Simulationsverfahren möglich, weshalb ein solches in VDI 2078:2015 für die Ermittlung der Kühllast bereits vorgesehen ist.
B. Bewertung zeitabhängiger Effekte: Die statischen Berechnungsverfahren enthalten so starke Vereinfachungen, dass die Bewertung bestimmter Effekte gar nicht erfolgen kann, beispielsweise die Nachtabsenkung von Sollraum- und/oder Heizmedienvorlauftemperaturen, effizientere Beleuchtung und Ausstattungsgegenstände, Einsatz geregelter Pumpen. Aufgrund der stationären Berechnungsansätze können insb. Speicherfüllstände nicht hinreichend berücksichtigt werden.
C. Berechenbarkeit von Nicht-Standard-Konfigurationen wie
   - Multivalente Systeme: Mit der Einbindung von erneuerbaren Energien nimmt die Verbreitung multivalenter Systeme immer mehr zu, Bivalente Erzeugungsanlagen mit einem dedizierten Grund- und Spitzenlastgerät reichen oft nicht mehr aus.
   - Besondere Betriebsweisen: Während für Bivalente Anlagen die Vordefinition standardisierter Zusammenwirkungskonzepte (Bivalent parallel / bivalent alternativ) noch möglich war, ist dies für multivalente Anlagen aufgrund des großen Möglichkeitsraums nicht mehr realisierbar. Dementsprechend können auch keine Kennwerte dafür normiert werden.
   - Geometrien: Für architektonisch innovative Gebäude sind die betrachteten Geometrien oft sehr unregelmäßig und die den genormten Verfahren zugrunde liegenden Vereinfachungen verlieren ihre Gültigkeit.
D. Effiziente Regelungskonzepte: Ein Großteil der Effizienz in Anlagen ensteht durch eine anforderungsgerechte Regelung im Betrieb: Regelalgorithmen können für multivalente Systeme nur mit Simulationsverfahren sinnvoll entworfen und bewertet werden
E. Zusätzliche Mehrwerte entstehen, wenn ein- und dasselbe Modell mit lediglich anderer Parametrierung für verschiedene Fragestellungen z.B. die Berechnung des Sommerlichen Wärmeschutz und die Kühllastermittlung genutzt werden. Eine Nachnutzung der Modelle in Betriebsphase sichert zusätzliche Mehrwerte.

1.2. Simulationsarten

Simulationsverfahren können entsprechend ihres «Model of Computation» (MoC) wie folgt gruppiert werden
- Thermische Simulation («Gebäudesimulation»)
- Thermohydraulische Simulation (Heiz-, Kühl-, Lüftungsanlagen – «Anlagensimulation»)
- Diskrete Modellierung: CFD «Computational Fluid Dynamics», FEM
- Thermohygrische Simulation (Bauteile)

In diesem Tagungsbeitrag wird die Anlagensimulation schwerpunktmäßig betrachtet: Sie kommt alternativ zu klassischen Planungsverfahren wie z.B. VDI 4645 für die die Konzeption der Technische Gebäudeausrüstung (TGA) zur Anwendung. Die anlagensimulation

(AS) zeichnet sich dadurch aus, dass sie die Wechselwirkungen der Anlagentechnischen Komponenten (Wärmepumpe, Speicher, BHKW, Netz, Verbrauch) untereinander untersucht. Die Gebäudesimulation (GS) liefert idR die Randbedingungen für die Anlagensimulation. Diese Lastermittlung für die Auslegung als zeitiger Schritt des TGA-Planungsprozess' zeichnet sich durch eine enge Kopplung zwischen Architektur (GS) und TGA (AS) aus. Die Gebäudesimulation (GS) wird alternativ zu (quasi)statischen Berechnungsverfahren wie der Heizlastberechnung nach DIN EN 12831-1 angewendet und untersucht die thermischen Wechselwirkungen zwischen Wetter, Gebäudemassen und Innenräumen. Verschiedene MoC können seriell nacheinander verwendet werden oder im Rahmen einer gekoppelten Simulation verbunden werden. In [1] wurden Simulationsszenarien hinsichtlich des Zusammenwirkens von Gebäude- und Anlagensimulation herausgearbeitet.

2. Status Quo

2.1. Hinderungsgründe

Trotz der zahlreichen in Abschnitt 1.1 genannten Vorteile ist der Einsatz von Simulationsverfahren in der Planungspraxis bisher die Ausnahme. Die folgenden Hemmnisse stehen dem entgegen:

F. Aufwand für Modellerstellung: Es entsteht erheblicher Aufwand für die Modellerstellung.
G. Nachvollziehbarkeit: Simulationsverfahren sind schwerer nachzuvollziehen als stationäre Berechnungen. Es sind daher idR Expertenwissen notwendig, um sie anzuwenden.
H. Normkonformität: Simulationsverfahren sind oft nicht normkonform. Dadurch entsteht eine formelle und ggf. juristische Hürde. Im Sinne einer «allgemein anerkannten Regel der Technik» (a.a.R.d.T.) ist der Einsatz von Simulationsverfahren dadurch jedoch nicht ausgeschlossen, sondern – im Gegenteil – unter Umständen sogar angezeigt.
I. Abstimmungsaufwand: Aufgrund der Komplexität des Verfahrens sind zahlreiche Randparameter notwendig, welche ggf. mit der Bauherrschaft abzustimmen sind. Auch aufgrund der o.g. formellen Hürde besteht erhöhter Beratungsbedarf.
J. Honorierung: Simulationsverfahren sind keine Grundleistung nach HOAI. Entsprechend den in der HOAI festgelegten Honorargrundsätzen sind Verfahren, die zu verminderten Anlagengrößen und damit Investitionssummen führen, sogar kontraproduktiv für den Planer, da kleiner ausgelegte Anlagen das Honorar schmälern.

Man erkennt, dass die letztgenannten Hemmnisse (G bis J) durch die seltene Nutzung der Verfahren entstehen. Ein verringerter Aufwand für die Modellerstellung, vermeidet die einzige «objektive» Hürde (F) und kann damit dazu beitragen, dass die Mehrwerte von Simulationsuntersuchungen bei mehr Gebäuden zu Anwendung kommen könnten.
Die erhöhten Aufwände einer Simulation haben eine ähnlich Charakteristik, wie sie die McLeamy-Kurve für die BIM-Methodik beschreibt: Aufwände werden vorverlagert in eine Phase, wo Design-Änderungen noch günstiger möglich sind. Im Unterschied zur McLeamy-Kurve bei der BIM-Methodik, werden bei Simulationsbetrachtungen Aufwände aus der Inbetriebnahme- und Betriebsphase in die Planungsphase verlagert und somit in die Domäne ganz anderer Projektbeteiligter verschoben, was die Honorierungsproblematik weiter verschärft.

2.2. Potential des OpenBIM-Formats IFC

Die ohnehin bestehende Entwicklung zum verbreiteten Einsatz von Building Information Management (BIM) in Planungsprozessen kann dazu beitragen, den oben thematisierten Aufwand für die Modellerstellung zu verringern. Die Modellerstellung durch den TGA-Fachplaner oder den Simulationsingenieur ist dabei wie viele andere Planungsprozesse dadruch gekennzeichnet, dass ein Teil der notwendigen Informationen von einem anderen Planungsbeteiligten zu einem «Stand» übernommen wird, anschließend weiter Informationen ergänzt werden und im Ergebnis ein neuer «Stand» übergeben wird. Die Austauschprozesse von «Ständen» sollen durch BIM vereinfacht werden – Doppelarbeit möglichst vollständig vermieden werden. Dazu wird an den Schnittstellen / beim Austausch auf Standards gesetzt. Die grundsätzlichen Konzepte dazu sind in DIN EN ISO 19650-1 dargestellt. Mit den

Industrial Foundation Classes (IFC) wurde ein Datenschema und Dateiformat spezifiziert und 2005 erstmals als ISO 16739-1:2018 normiert. In Hinblick auf die Bereitstellung von Informationen für Simulationsanwendungen sind insb. folgende Aspekte von IFC hervorzuheben:

- Es existiert ein umfangreicher Katalog von Klassen für Objekte (im Bereich der Anlagentechnik seit Version IFC4) sowie zugehöriger *PredefinedTypes*. Benutzerdefinierte Typen können mittels Type-Objekten erstellt und ineinander verschachtelt werden.
- Es existieren flexible Möglichkeiten für die Zuweisung von Eigenschaften zu Objekten mittels Attributen, vordefinierten und benutzerdefinierten *PropertySets*.
- Es existieren umfangreiche Möglichkeiten zur Strukturierung von Modellen in Hinblick auf hierarchische räumliche Strukturen (Liegenschaft, Baukörper, Geschosse, Räume), hierarchische Anlagenstrukturen (ineinander verschachtelte Systeme und Teilsysteme), sowie für die nicht-hierarchische Gruppierung von Objekten wie Räumen oder Bauteilen.
- Eine flexible Zuordnung von Geometrien ist möglich: Zu Objekten können eine beliebige Anzahl von Repräsentation zugeordnet werden. Dadurch sind reine Datenmodelle ohne Geometrie ebenso denkbar, wie Modelle, die für jedes Objekt eine dreidimensionale und eine schematische zweidimensionale Darstellung enthalten.
- Topologischer Anlagenstrukturen können abgebildet werden: Dafür werden Objekten s.g. *IfcDistributionPort*s zugeordnet. Diese *IfcDistributionPort*s können mit der *IfcRelConnectsPorts*-Relationen untereinander verbunden werden.

2.3. Möglichkeiten mit Modelica

Modelica ist eine objektorientierte Modellierungssprache für multiphysikalische Systeme. Sie unterstützt die Verbindung von Komponenten, die durch mathematische Gleichungen abgebildet werden und erleichtert damit insbesondere das Erstellen von White-Box-Modellen. Objektorientierte Konstrukte erleichtern die Wiederverwendung von Modellen und die Erstellung komplexer Modelle, inbesondere auch solcher Modelle, die Teilkomponenten aus verschiedenen Domänen z.B. Mechanik, Thermodynamik und Elektrotechnik enthalten.

Modelica wurde 1997 von der Modelica Association vorgestellt und wird seitdem von dieser gepflegt. Die Entwicklung erfolgt quelloffen und die Sprachspezifikation ist unter freier Lizenz verfügbar. Wesentliche Komponenten von Modelica sind die *Modelica Language Specification* (MLS) und die *Modelica Standard Library* (MSL). Mit OpenModelica steht ein FLOSS-Simulator (Free/Libre and Open Source Software) für Modelica zur Verfügung.

Ein weiterer Vorteil von Modelica ist die Verfügbarkeit hochentwickelter Bibliotheken. Es kann unterschieden werden zwischen kommerziellen Bibliotheken, deren Quellcode idR nicht offen zur Verfügung steht und FLOSS-Bibliotheken. Wichtige Bibliotheken werden im Folgenden kurz charakterisiert.

Unabhängig von der Simulationsdomäne kommt die *Modelica Standard Library* zur Anwendung. Abb. 1 zeigt einen Überblick der enthaltenen Subpackages. Im Kontext der GS/AS sind Komponenten aus dem *Modelica.Blocks*-Package wichtig für die Abbildung einfacher Randbedingungen und der Regelungstechnik.

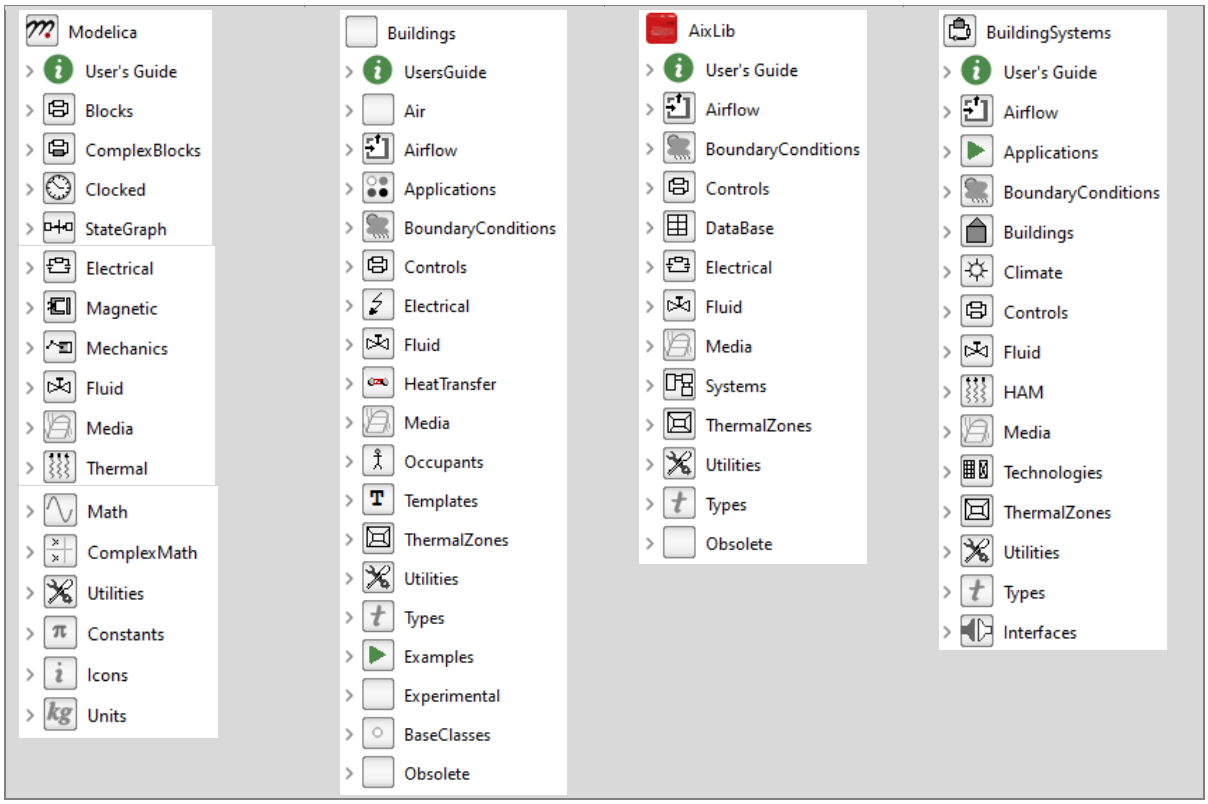


Abbildung 1: Package Struktur ausgewählter Modelica-Libraries

Für Gebäude- und Anlagensimulation existieren spezielle Domänenbibliotheken. Von besonderer Bedeutung sind dabei die s.g. IBPSA-Libraries. Diese entstanden in den Jahren im Rahmen des Annex60-Projekts [2] durch die Harmonisierung von vier auch vorher schon vorhandenen FLOSS-Gebäude-Simulationsbibliotheken: AixLib, der RWTH Aachen, Buildings, des LBNL Berkeley (CA, USA) (MBL), BuildingSystems, der UdK Berlin (BS) und IDEAS der KU Leuven, Belgium. Diese vier Bibliotheken werden als IBPSA-Libraries bezeichnet. Jede der Bibliotheken erweitert den gemeinsamen Kern um eigenentwickelte Simulationsmodelle, welche in Tab. 1 gegenübergestellt werden. Die enthaltenen Module sind in Abb. 1 dargestellt.
Eine wesentliche gemeinsame Modellierungsgrundlage der IBPSA-Libraries ist die Nutzung der *FluidPorts* und *HeatPorts* aus der MSL, somit sind die Modelle aus verschiedenen Bibliotheken untereinander kompatibel. Detailliertere Ausführungen zu diesen Simulationsbibliotheken, sowie eine Bewertung in Hinblick auf die verschiedenen Simulationsszenarien finden sich in [3].

2.4. Erzeugung von Simulations- aus BIM-Modellen (BIM2SIM)

Die Erzeugung von Simulationsmodellen aus BIM-Modellen ist seit einigen Jahren Gegenstand der Forschung. Review-Paper für dieses Gebiet wurden vorgelegt von [4], [5], [6], [7], [8]. Dabei wurden die MoC Gebäude- und Anlagensimulation betrachtet. Diese Recherchen beschränkten sich BIM-seitig nicht auf IFC – mit gbXML existiert eine weiteres Format, welches einige Verbreitung insb. im Bereich der Simulation gefunden hat. Auch simulationsseitig wurden verschiedene Modellierungssprachen, nicht nur Modelica, berücksichtigt. In Tab. 2 sind ausgewählte Arbeiten klassifiziert dargestellt. Man erkennt, dass die Anlagensimulation nur von wenigen Autoren berücksichtigt wird. In der Regel wird von den Autoren, wenn Gebäude- und Anlagensimulation betrachtet werden, ein separates Vorgehen für beide MoC beschrieben. Die Anlagensimulation wird dabei häufig nicht aus BIM übernommen bzw. ist der manuelle Nacharbeitsaufwand enorm. Insbesondere tritt dieses Problem auf, wenn Anlagensimulationsmodelle erzeugt werden sollen, bevor die Geometrie definiert wurde, dies ist jedoch der logische Ablauf der Planung, da das Anlagenkonzept idR aufgestellt wird, bevor die Geometrie dazu feststeht. In diesem Fall ist die Arbeitsweise SIM2BIM, die in Abschnitt 4.2 beispielhaft gezeigt wird, sinnvoll.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der IBPSA-Bibliotheken

		Buildings (MBL)	AixLib	BuildingSystems (BS)
github Repository		lbl-srg/ modelica-buildings	RWTH-EBC/ AixLib	UdK-VPT/ BuildingSystems
Aktuelleste Version		10.0.0 (5.9.2023)	1.3.2 (9.2.23)	2.0.0 (22.5.17)
Inhalte	**Gebäudeseite**	Spawn of EnergyPlus	Quartiere HighOrder	Quartiere Gebäudetypen Deutschland
	Wärmeübergabe	Deckenstrahlplatten Bauteilintegrierte Heizung Luftheizer	Bauteilintegrierte Heizung Lüftungsgeräte	
	Thermische Erzeuger	Absorptionskälteaschinen Kühltürme KWK Wärmeübertrager Wärmepumpen Erdsonden	KWK Wärmepumpen Kennfeldmodell Solarthermie	Solarthermie Kältemaschinen KWK Fernwärmestationen
	Elektrisch	Umfangreicher Katalog (1 und 3-phasig) mit Erzeugern (PV, Windrad) und Umrichtern	PV-Paneele Wechselrichter	PV Batteriespeicher
	Hydraulik		Pumpenmodelle Hydraulische Gruppen	Erdverlegte Rohre
	Regelung	OpenBuildingControl	Komplexe Anlagenregelung	
	Sonstiges	Validierung ASHRAE36 HeatTransfer Umfangreiche Nutzungszeitpläne	Testmodelle ASHRAE140 Stoffmodelle für Kältemittel	Wetterdaten DWD, TRY HeatAirMoistureTransport
	Komplexbeispiele	Rechenzentrum	Einfamilienhaus	Nahwärmenetz Berlin
	Eigene Konnektoren	Nur für die elektrische Bibliothek	Keine mehr (entsprechende Bibliotheks-Komponenten sind inzwischen deprecated)	RadiationPort (und zahlreiche weitere)

* (02/2023-01/2024) **inzwischen wieder deprecated

[6] haben eine umfangreiche strukturierte Literaturrecherche zur Interoperabilität zwischen BIM und Simulation durchgeführt. Sie unterteilen die veröffentlichten Arbeiten in drei Gruppen: zunächst die «aktuelle Ingenieurpraxis», welche idR Autodesk-Produkte nutzt und insofern als closed BIM einzuordnen ist. Eine zweite Gruppe sind «Skripting»-Ansätze, welche entweder in das Authoring-Werkzeug als Plugin eingebaut oder über s.g. Middleware-Tools realisiert werden. Dabei werden idR weitere Inputdateien – über die BIM und Simulationsdatei hinaus – einbezogen, welche keinem standardisierten Format folgen. Als dritte Gruppe bezeichnen sie Lösungsansätze, welche auf IFC basieren und sich dessen flexible Struktur zu Nutze machen, um alle simulationsrelevanten Informationen zu speichern.

Tabelle 2: wissenschaftliche Veröffentlichung im Bereich BIM2SIM

Quelle	Ziel	Veröffentlichungen	GS**	AS**
IFC	Modelica	Siehe Tab. 3	☑	☑
IFC	EnergyPlus	[7]	☑ 17	☒
		[9], [10]	☑	☑
		In [8]: 3	☑	☒
		[11], [12], [13], [14]	☑	☒
IFC	Sonstige	11 Veröffentlichungen in [7] Zielsysteme u.A. TRNSYS, PHPP, DOE2	☑	☑
		4 in [8] Zielsysteme u.A. DOEs, Cometh, Matlab	☑	☒
		eeEmbedded: [15]: Zielsysteme u.A. TRNSYS-TUD, CFD-Tools	☑	☒
		[16], [17]	☑	☒
gbXML	Verschiedene	In [7]: 19 Veröffentlichungen	☑ 19	☑ 1
		[18]: Vergleich gbXML und IFC, aber keine Betrachtung von Modelica als Zielsystem	☑	☒
		[8], [19], [20], [21]	☑	☒
CAD*	verschiedene	[22]: Revit->DesignBuilder	☑	☒
		[23]: Revit->Modelica (nur Gebäudesimulation)	☑	☒
		[17]	☑	☒

*proprietäre Formate, ** Angabe zur Anzahl bei Review-Papern

Im Bereich der Verbindung von IFC und Modelica sind die relevanten Beiträge im Umfeld des Projekts «IEA IBC Annex 60» [2] und dem Folgeprojekt «IBPSA Projekt 1» [24] geleistet worden. Es wurden die in Tab. 3 zusammengefassten Toolchains für die Erzeugung von Simulations- aus BIM-Modellen vorgeschlagen.

Tabelle 3: wissenschaftliche Veröffentlichungen zu IFC2Modelica

Veröffentlichungen	Ziel-Library	GS	AS	Bemerkung
„BII (BIM- IFC-Ifc2Modelica)“ [25], [26], [27]	IDEAS	☑	☑ nur RLT	genaue Entsprechung von Modelica-Modell zu IFC-Entität muss da sein, Ergänzung fehlender Sachen aus IFC im Tool Ifc2Modelica, dieses ist aber nicht aufzufinden
„BIM2Modelica“ [28]	AixLib, BS	☑	☒	(CoTeTo basierend auf SimModel), Ausführung mit JModelica als FMU
[18]	VEPZZO	☑	☒	
[29], [30], [31], [32], [33]	AixLib, BS, MBL	☑	☑	Zwischenmodell SimModel, Schwerpunkt auch auf HVAC

Bzgl. der Anlagen- und zugehörigen Lösung wurden jedoch nur bruchstückhafte Lösungen gefunden – keines der Tools bietet eine praxistaugliche, halbwegs vollständige Implementierung.

2.5. Erzeugung von BIM- aus Simulationsmodellen (SIM2BIM)

Der «Rückweg» von der Simulation zu BIM wird in der Literatur kaum behandelt, wie auch [34] in ihrer Recherche herausfanden. Eine Ausnahme bilden die Veröffentlichungen eben dieser Autoren: In [35] wird eine Methodik für den Bidirektionalen Austausch zwischen dem EnergyPlus-Format IDF und IFC für Bauphysikalische Komponenten (Wände, Fenster, etc.) beschrieben, in [36] wird die Anlagentechnik thematisiert. Andere Autoren beschäftigen sich bzgl. des Rückwegs von Simulation zu BIM ausschließlich mit der Übertragung von Eigenschaften als *IfcProperties*.
Wie bereits thematisiert wurde, existiert insb. für den Entwurf von Anlagenkonzepten jedoch auch der Anwendungsfall des Erstentwurfs im Simulationstool – ein Anwendungsfall den auch [36] adressieren. Das Funktionsmodell der Anlage wird dann im Simulationswerkzeug erstellt. Dieses Funktionsmodell kann anschließend mit Geometrie angereichert werden, um daraus ein Konstruktionsmodell zu generieren. Um die Anreicherung zu ermöglichen wird das Simulationsmodell zunächst in das IFC-Format überführt. Dieser SIM2BIM-Workflow wird in Abschnitt 4.2 exemplarisch dargestellt.

3. Toolset MO-x-IFC für die bidirektionale Übersetzung zwischen Modelica und IFC

An Stelle der in Tab. 3 aufgeführten Konvertertools für die Erzeugung von Modelica-Modellen aus IFC-Modellen kann das modulare Datenflusssystem «MO-x-IFC-Toolset» verwendet werden, dieses funktioniert bidirektional und besteht aus mehreren Konvertern, die in Abb. 2 durch Pfeile dargestellt sind.

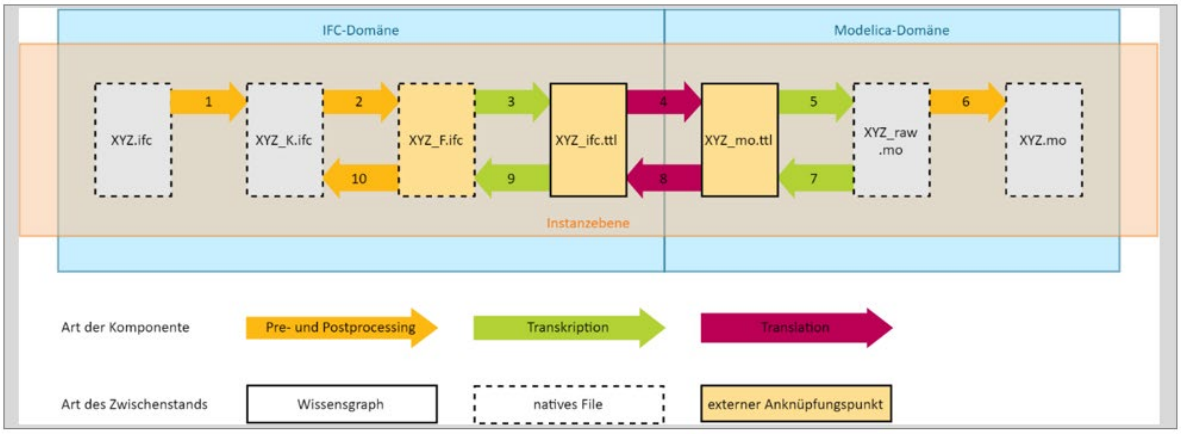


Abbildung 2: Zusammenwirken von MO-x-IFC-Konverter (MOXIK) für die Anwendungsfälle BIM2SIM und SIM2BIM zur Überführung zwischen IFC und Modelica, Erläuterung der Ziffern in Tab. 4

Um eine modulare Anwendbarkeit der verschiedenen Konverter zu gewährleisten, müssen alle Zwischenstände (Boxen in Abb. 2) in Form standardisierter Dateien vorliegen: Außer den beiden nativen Dateiformaten IFC-STEP und Modelica, kommen dabei ausschließlich RDF-Wissensgraphen zum Einsatz. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu den in der

Literatur vorgestellten Konvertierungswerkzeugen, die oftmals auf speziell für den Anwendungsfall definierte Datenschemata und Dateiformate setzen. Die Zwischenstände enthalten jeweils alle für die Folgeschritte notwendigen Informationen.

Tabelle 4: Übersicht MO-x-IFC-Konverter (MOXIK)

Nr	Kurzbezeichnung	Inhalt	Verfügbarkeit der Komponenten auf github (https://github.com/...)
1	Vorbereitungen	Anforderungen an IFC erfüllen	ElisEck/MO-x-IFC/
2	Schematizer	Schematisierer	ElisEck/MO-x-IFC/
3	IFC2RDF	Überführung IFC in KG	pipauwel/IFCtoRDF/releases/tag/IFCtoRDF-0.4
4	SemTran	Semantic Translation	ElisEck/MO-x-IFC/
5	TTL2MO		ElisEck/MO-x-IFC/
7	MoTTL-Transcriptor	MoTTL-	ElisEck/MO-x-IFC/releases/tag/v0.9.0
8	ProTran	Procedural Translation	ElisEck/MO-x-IFC/
9	RDF2IFC	Überführung von KG in IFC-STEP	ElisEck/RDF2IFC/releases/tag/v1.1.0
10	Voluminizer	Ergänzung von (Platzhalter)-Geometrien	ElisEck/MO-x-IFC/

4. Beispielhafte Anwendung

4.1. BIM2SIM

Abb. 3 zeigt das Konstruktionsmodell eine Kälteanlage eines Institutsgebäudes (XYZ_K.ifc in Abb. 2). Anhand des hervorgehobenen kleinsten Kühlkreises wird die Anwendung des MO-x-IFC-Toolsets für die Erzeugung eines Modelica-Modells für die Anlagensimulation aus diesem IFC-Modell aufgezeigt. Alle beschriebenen Schritte erfolgen automatisch mit den in Abb. 2 und Tab. 4 dargestellten Konvertern.

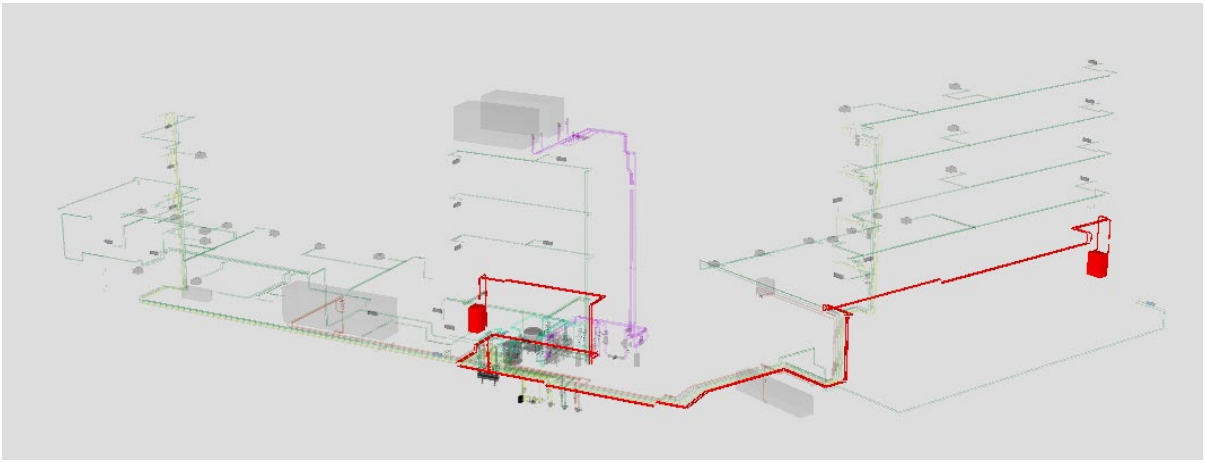


Abbildung 3: Konstruktionsmodell des Kaltwassersystems (das betrachtete Teilsystem in rot)

Zunächst wird die Topologie der Anlage mittels des Konverters *Schematizer* in einen Graph überführt, wie in Abb. 4 dargestellt. Jedes Bauteil wird als Punkt dargestellt und mit seinen benachbarten Komponenten durch eine Linie verbunden. Die Bauteile können nun in «simulationsrelevant» und «nicht-simulationsrelevant» unterteilt werden. Reihenschaltungen «nicht-simulationsrelevanter» Bauteile werden anschließend durch *replacements* ersetzt, welche den durch die Bauteile verursachten Druckverlust repräsentieren. Es entsteht der in Abb. 5 dargestellte vereinfachte Graph, welcher sich durch eine deutliche Reduzierung der Größe (auf ca. 20%) auszeichnet.

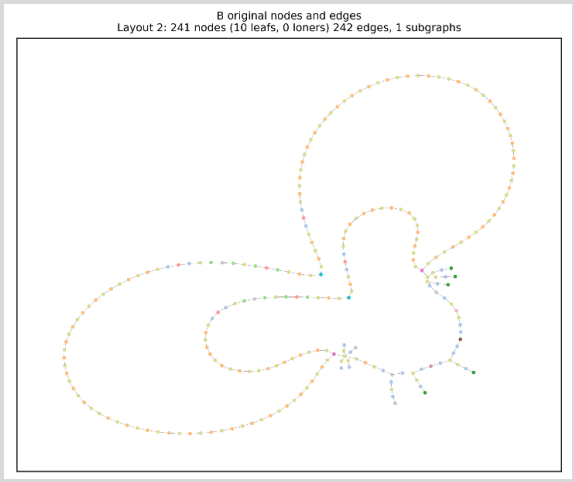


Abb. 4 vollständiger Anlagengraph des Beispielmodells

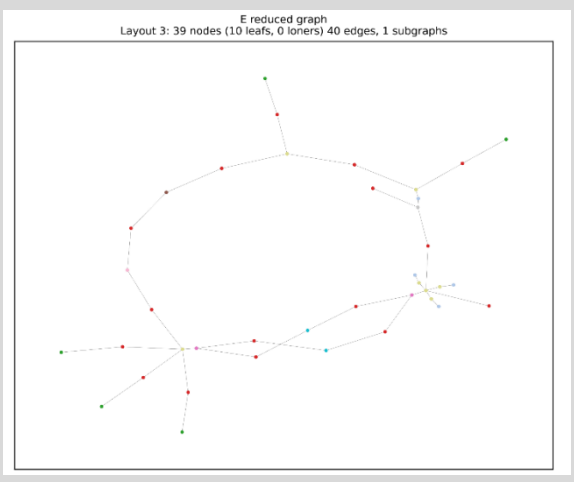


Abb. 5 vereinfachter Anlagengraph: *replacements* sind durch rote Punkte dargestellt

Dieser vereinfachte Graph wird nun zunächst als zusätzliche 2D-Darstellung in der IFC-Datei XYZ_F.ifc (gem. Abb. 2) hinterlegt. Abb. 6 zeigt dies visualiert in einem IFC-Viewer. Das IFC-Schema unterstützt verschiedene Darstellungen für ein und dasselbe Objekt. Dies gewährleistet, dass alle Attribute und Parameter, welche einem Objekt zugeordnet sind, sowohl in der 3D-, als auch in der 2D-Repräsentation auswählbar sind. Inkonsistenzen zwischen Konstruktionsmodell und der schematischen Darstellung sind dadurch unmöglich.

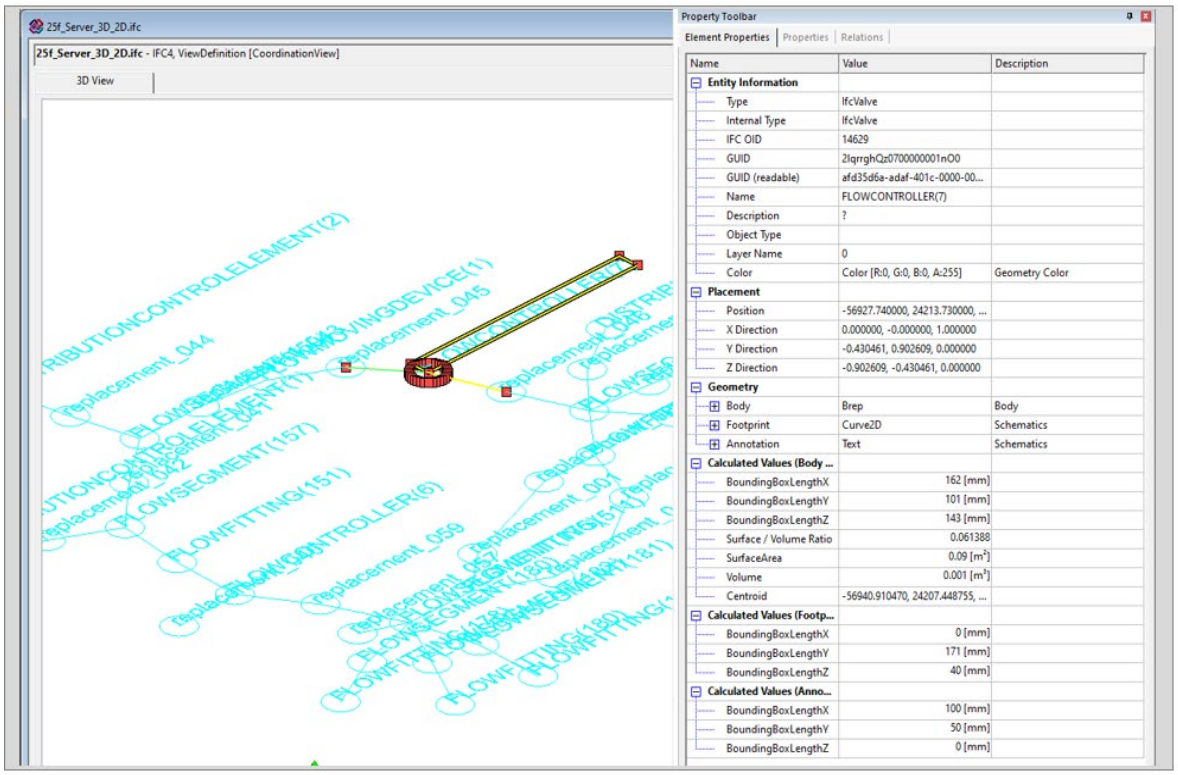


Abbildung 6: schematische Darstellung des Serverkreis‘ im IFC (Screenshot aus FZK-Viewer)

Das IFC-Modell wird anschließend durch den *IFC2RDF*-Konverter in einen Wissensgraphen mit IFC-OWL-Vokabular überführt (XYZ_ifc.ttl). Dieser wird mittel *Semantic Translation* in einen Wissensgraphen mit MoOnt-Vokabular (XYZ_mo.ttl) übersetzt. Das dafür notwendige «Wörterbuch» zeigt ausschnittsweise Tab. 5.

Tabelle 5: Mapping zwischen IFC und Modelica-AixLib für hydraulische Komponenten

IFC		**Modelica**
Klasse	**PredefinedType**	**AixLib Kompoente**
IfcPipeSegment	IfcPipeSegmentType=RIGIDSEGMENT	AixLib.Fluid.FixedResistances.LosslessPipe
	IfcPipeFittingType=JUNCTION	AixLib.Fluid.FixedResistances.Junction
IfcFlowInstrument	IfcFlowInstrumentType =PRESSUREGAUGE	AixLib.Fluid.Sensors.RelativePressure
IfcHeatExchanger	IfcHeatExchangerType =PLATE	AixLib.Fluid.HeatExchangers.ConstantEffectiveness
IfcPump	IfcPumpType=CIRCULATOR	AixLib.Fluid.Movers.SpeedControlled_y
IfcValve	IfcValveType =CHECK	AixLib.Fluid.FixedResistances.CheckValve
	IfcValveType =ISOLATING	AixLib.Fluid.Actuators.Valves.TwoWayLinear
	IfcValveType =MIXING	AixLib.Fluid.Actuators.Valves.ThreeWayLinear
IfcTank	IfcTankType=EXPANSION	AixLib.Fluid.Sources.Boundary_pT
	IfcTankType=STORAGE	AixLib.Fluid.Storage.Stratified
IfcSensor	IfcSensorType=FLOWSENSOR	AixLib.Fluid.Sensors.EnthalpyFlowRate
	IfcSensorType=PRESSURESENSOR	AixLib.Fluid.Sensors.Pressure
	IfcSensorType=TEMPERATURESENSOR	AixLib.Fluid.Sensors.TemperatureTwoPort
IfcBoiler	IfcBoilerType=WATER	AixLib.Fluid.BoilerCHP.Boiler

Der Wissensgraphen mit MoOnt-Vokabular (XYZ_mo.ttl) wird in einem letzten Schritt durch den Konverter *TTL2MO* wieder in eine native Modelica-Datei (XYZ_raw.mo) übertragen. Abb. 7 zeigt den Diagram-Layer des erzeugten Modells. Dieses enthält die simulationsrelevanten Bauteile, sowie die zugehörigen Verbindungen zu den Nachbarelementen, weiterhin wird die GlobalID als eindeutiger Identifikator im IFC-Modell übertragen – dies ermöglicht die eineindeutige Zuordenbarkeit der Simulationsmodellkomponenten zu Bauteilen im IFC-Modell.

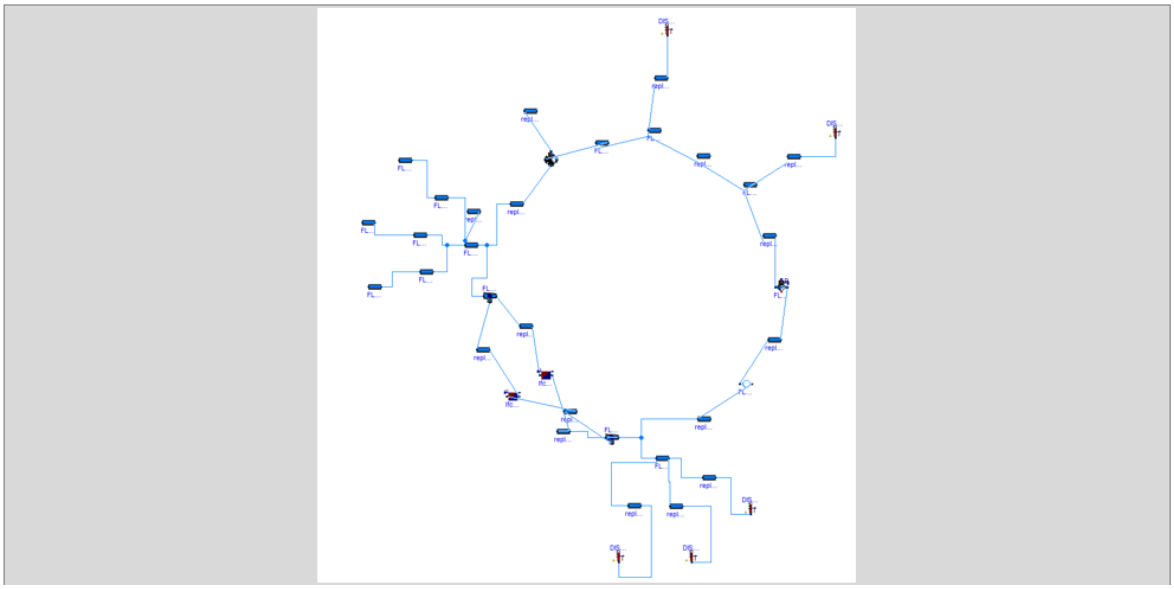


Abbildung 7: Diagram-Layer des erzeugten Modelica-Modells des Kältekreises

Die notwendigen Nacharbeiten, um das Modelica-Modell in einen simulationsfähigen Zustand (XYZ.mo) zu versetzen sind mit wenig manuellem Aufwand verbunden und werden in [37] dargestelllt.

4.2. Beispiel SIM2BIM

Abb. 8 zeigt das Schaltschema eines Versuchsstands. Aufgrund der komplexen Hydraulik wurde dieser zunächst als Simulationsmodell entworfen und ist somit ein Anwendungsfall für den SIM2BIM Workflow. Die Modelica-Datei (HIL.mo) wird mit Hilfe des *MoTTL-Transcriptors* in einen Wissensgraphen mit Modelica-Vokabular (HIL_mo.ttl) umgewandelt. Dieser Wissensgraph wird mittels Procedural Translation (Konverter *ProTran*) in einen Wissensgraph mit IFC-Vokabular (HIL_ifc.ttl) übersetzt. Der Konverter *RDF2IFC* transkribiert diese Datei in eine IFC-STEP-Datei (HIL_F.ifc). Dabei handelt es sich um ein valides IFC-Modell, welches das Funktionsmodell der Beispielanlage repräsentiert. Es kann ohne Fehlermeldungen z.B. mit dem KIT-Viewer geöffnet werden, besitzt jedoch noch keinerlei geometrische Repräsentation.

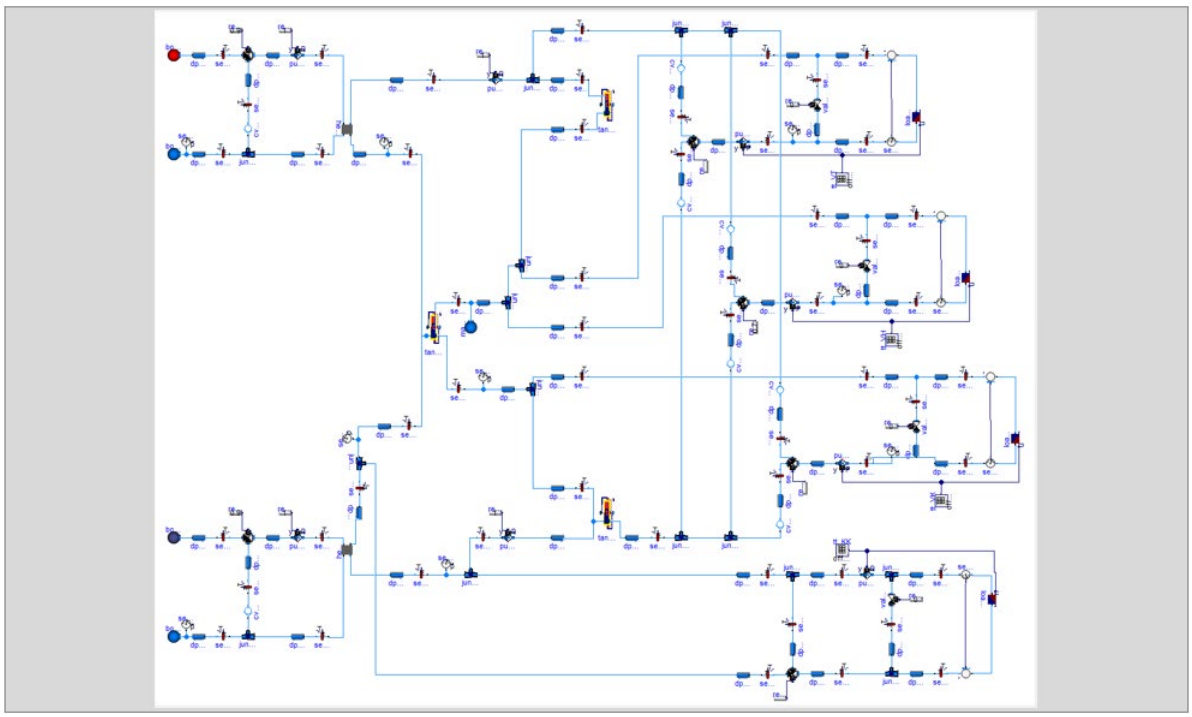


Abbildung 8: Demonstrator Versuchsstand EAS (Diagram-Layer des Modelica-Modells)

Für das Handling in IFC-Viewern und Autorentools ist es notwendig, die erzeugten IFC-Objekte mit einer geometrischen Repräsentation zu versehen. Dies realisiert der Konverter *Voluminizer*.
Zunächst wird eine 2D-Repräsentation zugewiesen. Abb. 9 zeigt das Ergebnis. Man erkennt, dass derzeit nur eine vereinfachte 2D-Repräsentation realisiert ist, dabei wird unabhängig von der Objekt-Klasse und -Typisierung immer dasselbe Symbol (Kreis) verwendet. Weiterhin werden alle semantischen Verbindungen durch eine gerade Verbindung visualisiert. Die Bezeichnung der Objekte wird als separate Repräsentation angelegt, damit können die verschiedenen Darstellungen mit einem geeigneten Ifc-Viewer z.B. KIT-Viewer separat zu- und abgeschaltet werden.
Aufgrund der Beschränkungen vieler IFC-Viewer, die keine 2D-Repräsentationen anzeigen können, wird zusätzlich eine 3D-Geometrie generiert. Dabei wird entsprechend der Klasse und des *predefinedType* eines Objekts, ein bestimmter Körper in einer festgelegten Farbe realisiert.

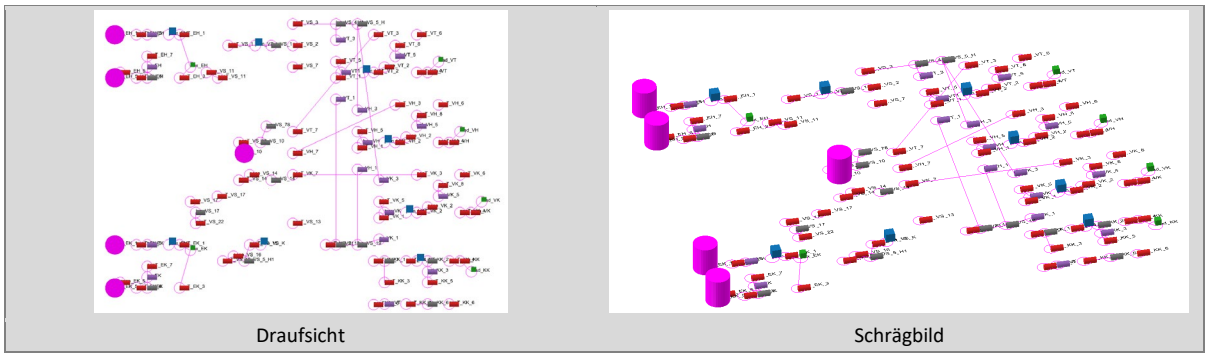


Abbildung 9: Geometrisch angereichertes IFC-Modell des HIL-Prüfstands HIL_K.ifc (Screenshots aus KIT-Viewer)

5. Bewertung

Das MO-x-IFC-Toolset ermöglich die bidirektionale Übersetzung zwischen IFC und Modelica im Bereich der Anlagensimulation. Dieses MoC wurde bisher von den meisten Autoren nicht oder nur am Rande behandelt.

Als Zwischenschritte der bidirektionalen Übersetzung wurden neben den nativen Dateiformaten ausschließlich Wissensgraphen verwendet. Das notwendige Vokabular (MoOnt) und die zugehörigen Transkriptoren (MoTTL-Transcriptor, TTL2MO) für die Modelica-Domäne wurden in [37] entwickelt.
Es wurden Wissensgraphen als Zwischenstände der Umwandlung zwischen Modelica und IFC gewählt. Wissensgraphen sind hochgradig interoperabel und erfahren eine zunehmende Anwendung im Semantic Web, aber auch innerhalb geschlossener Systeme. Daraus ergeben sich weitere Anwendungsmöglichkeiten für die Zwischenstände der Übersetzung: Dies wurde z.B. in [38] für die Entwurfsplanung der Gebäudeautomation (GA) dargestellt, auch für die Ausführungsplanung und Inbetriebnahme der GA sind Anwendungen denkbar. Um die Vielzahl Möglichkeiten zu illustrieren ist in Abb. 30 eine Visualisierung der «Linked Open Data Cloud» dargestellt – man erkennt die zahlreichen verfügbaren freien Ontologien und deren Wachstum in den letzten 15 Jahren.

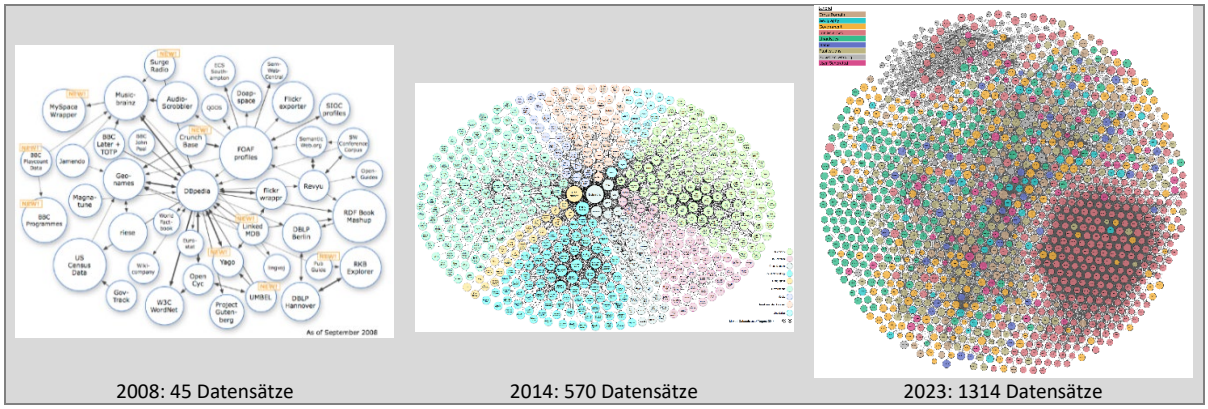


Abbildung 10: Linked Open Data Cloud (Bildquelle: https://lod-cloud.net/)

6. Literaturverzeichnis

[1] E. Eckstädt, A. Schneider, A. Paepcke, A. Nicolai, A. Hentschel, und F. Schumann, «Simulationsszenarien für Gebäudeenergiesimulation in frühen Planungsphasen», in *BauSIM 2020 Graz*, 2020. doi: 10.3217/978-3-85125-786-1.

[2] M. Wetter und C. van Treeck, «New generation computational tools for building & community energy systems», IEA EBC, 2017. [Online].
Verfügbar unter: http://www.iea-annex60.org/downloads/iea-ebc-annex60-final-report.pdf

[3] E. Eckstädt *u. a.*, *FMI4BIM – Standardisierte Schnittstelle für Analysemodelle von Anlagen- und Gebäudekomponenten für BIM-basierte Planung und Betrieb (Abschlussbericht)*. 2023. doi: 10.24406/publica-1997.

[4] A. Andriamamonjy, D. Saelens, und R. Klein, «A combined scientometric and conventional literature review to grasp the entire BIM knowledge and its integration with energy simulation», *Journal of Building Engineering*, 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2018.12.021.

[5] Ciccozzi, de Rubeis, Paoletti, und Ambrosini, «BIM to BEM for Building Energy Analysis: A Review of Interoperability Strategies», *energies*, 2023, doi: 10.3390/en16237845.

[6] Di Biccari, Calcerano, D'Uffizi, Esposito, Campari, und Gigliarelli, «Building information modeling and building performance simulation interoperability: State-of-the-art and trends in current literature», *Advanced Engineering Informatics*, 2023, doi: 10.1016/j.aei.2022.101753.

[7] H. Gao, C. Koch, und Y. Wu, «Building information modelling based building energy modelling: A review», *Applied Energy*, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.032.

[8] E. Kamel und A. Memari, «Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions», *Automation in Construction*, 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.11.008.

[9] V. Bazjanac und T. Maile, «IFC HVAC interface to EnergyPlus – A case of expanded interoperability forenergy simulation», in *IBPSA-USA national conference boulder*, 2004.

[10] B. O'Sullivan und M. Keane, «Specification of an ifc based intelligent graphical user interface to support building energy simulation», *IBPSA 2005*, 2005.

[11] K.-U. Ahn, Y.-J. Kim, C.-S. Park, I. Kim, und K. Lee, «BIM interface for full vs. semi-automated building energy simulation», *Energy and Buildings*, 2014, doi: doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.063.

[12] Porsani, del Valle de Lersundi, Sachez-Osteiz Gutierrez, und Bandera, «Interoperability between Building Information Modelling (BIM) and Building Energy Model (BEM)», *Applied Sciences*, 2021, doi: 10.3390/app11052167.

[13] Giannakis, «A methodology to automatically generate geometry inputs for energy performance simulation from IFC BIM models», in *IBPSA 2015 hyderabad*, University of Crete; Fraunhofer IBP, 2015.

[14] Giannakis, «A workflow and for automated and building energy and performance model and generation», gehalten auf der IBPSA 2019 Rome, University of Crete; UC London, 2019.

[15] P. Katranuschkov *u. a.*, «eeEmbedded – D6.2 multimodel mapper – simulation model generator», 2016.

[16] N. Leimbach, «Semantikbasierte Entwurfsautomatisierung gebäudetechnischer Anlagen», 2022. doi: 10.24406/publica-265.

[17] A. H. Elisabeth Eckstädt, Claudia Liersch René Hoch, Danny Borchert, Milad Khalili, «COMPARING BIM2SIM WORKFLOWS FOR COUPLED BUILDING AND HVAC SIMULATION», in *BauSIM 2022*, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://publications.ibpsa.org/conference/?id=bausim2022

[18] S. Stratbücker, M. Mitterhofer, G. Benndorf, M. Dang, und N. Rehault, «EnEff-BIM: Planung, Auslegung und Betriebsoptimierung von energieeffizienten Neu- und Bestandsbauten durch Modellierung und Simulation auf Basis von Bauwerkinformationsmodellen : Abschlussbericht 2», Fraunhofer IBP; Fraunhofer ISE, 2017. doi: 10.2314/GBV:895388456.

[19] V. Nasyrov, «Building Information Models als Input für Energetische Gebäudesimulation», Masterarbeit, TUM, 2013. [Online]. Verfügbar unter: https://publications.cms.bgu.tum.de/theses/nasyrov_2013_ritter.pdf

[20] Nasyrov, Stratbücker, Ritter, Borrmann, Hua, und Lindauer, «Building information models as input for building energy performance simulation – the current state of industrial implementations», in *ECPPM 2014*, 2014. doi: 10.1201/b17396-80.

[21] M. K. Bracht, A. P. Melo, und R. Lamberts, «A metamodel for building information modeling-building energy modeling integration in early design stage», *Automation in Construction*, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103422.

[22] K. Odeh und P. de Wilde, «BIM to BEM: an investigation of practical interoperability challenges when working with revit and DesignBuilder», in *EG-ICE 2020*, 2020. doi: 10.14279/depositonce-9977.

[23] W. Jeong, J. B. Kim, M. J. Clayton, J. S. Haberl, und W. Yan, «Translating building information modeling to building energy modeling using model view definition», *The Scientific World Journal*, 2014, doi: 10.1155/2014/638276.

[24] «IBPSA Project 1». Zugegriffen: 15. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://ibpsa.github.io/project1/index.html

[25] A. Andriamamonjy, «Automated workflows for building design and operation using openBIM and Modelica», PhD, KU Leuven, 2018. doi: 10.13140/RG.2.2.31108.78729.

[26] Andriamamonjy, D. Saelens, und R. Klein, «An automated IFC-based workflow for building energy performance simulation with Modelica», *Automation in Construction*, 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.03.019.

[27] G. Reynders, A. Andriamamonjy, R. Klein, und D. Saelens, «Towards an IFC-Modelica tool facilitating model complexity selection for building energy simulation», in *IBPSA 2017 san francisco*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://core.ac.uk/display/251175883

[28] Nytsch-Geusen, «BIM2Modelica-An open source toolchain for generating and simulationg thermal multi-zone building models by using structured data from BIM models», in *International Modelica Conference 13th, Regensburg, Germany*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://modelica-buildingsystems.de/pub/ModelicaConference2019.pdf

[29] C. van Treeck, D. Müller, P. von Both, C. Nytsch-Geusen, T. Maile, und R. Wimmer, «EnEff-BIM: Planung, Auslegung und Betriebsoptimierung von energieeffizienten Neu- und Bestandsbauten durch Modellierung und Simulation auf Basis von Bauwerkinformationsmodellen: Abschlussbericht», RWTH E3D; RWTH EBC; KIT; UdK; AEC3, 2017. doi: 10.2314/GBV:89124431X.

[30] J. Cao, «SimModel transformation middleware for modelica-based building EnergyModeling and simulation», PhD, RWTH E3D, 2018.

[31] R. Wimmer, «BIM-Informationsmanagement bei der Thermisch-Energetischen Simulation von gebäudetechnischen Anlagen», PhD, RWTH E3D, 2020.

[32] Cao, T. Maile, J. O'Donnell, R. Wimmer, und C. van Treeck, «Model Transformation From SIMMODEL To Modelica For Building Energy Performance Simulation», gehalten auf der BauSIM2014, 2014. [Online]. Verfügbar unter: https://publications.ibpsa.org/proceedings/bausim/2014/papers/bausim2014_1143.pdf

[33] Remmen *u. a.*, «An Open Framework For Integrated BIM-Based Building Performance Simulation Using Modelica», in *IBPSA 2015 hyderabad*, 2015. doi: 10.26868/25222708.2015.2384.

[34] Li *u. a.*, «Issues in Bi-Directional Interoperability between BIM and BEM», gehalten auf der Construction Research Congress, Arlington, VA, USA, 2022. doi: 10.1061/9780784483961.142.

[35] Li und J. Zhang, «Interoperability between BIM and BEM using IFC», gehalten auf der ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering, Reston, VA, USA, 2021. doi: 10.1061/9780784483893.078.

[36] H. Li und J. Zhang, «Improving IFC-Based Interoperability between BIM and BEM Using Invariant Signatures of HVAC Objects», *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2023, doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0001063.

[37] E. Eckstädt, Dissertation, TU Dresden, 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/ElisEck/MO-x-IFC

[38] E. Eckstädt, K. Menzel, H. Pruvost, und D. Mayer, «Representing Modelica Models as Knowledge Graphs using the MoOnt Ontology», gehalten auf der EC3, 2023. doi: 10.24406/publica-702.

BIM und Schallschutz – kommerzielle Tools und die Zukunft

Dr.-Ing. Camille Châteauvieux-Hellwig
TH Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Yvonne Weise
TH Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



BIM und Schallschutz – kommerzielle Tools und die Zukunft

Im Bausektor treibt die Diskussion um Nachhaltigkeit, Energieeffizienz und Klimaneutralität den Baustoff Holz in den Vordergrund. Bei der bauakustischen Planung stellt der Holzbau eine Herausforderung dar, da im Gegensatz zu Konstruktionen des Massivbaus Holzbaukonstruktionen deutlich geringere flächenbezogene Massen aufweisen und häufiger mehrschalige Aufbauten zum Einsatz kommen. Zusätzlich sind die Stoßstellen zwischen den Bauteilen im Gebäude komplexer ausgeführt. Diese Parameter beeinflussen das Schwingungsverhalten der Bauteile und somit auch die Schallübertragung. Die Berechnungs- und Prognoseverfahren für den Schallschutz im Holzbau sind damit deutlich aufwendiger, was weitere Forschung um Prognosewerte und angepasste Prognosemodelle notwendig macht. Zusätzlich ist der Fortschritt in der Digitalisierung im Bauwesen enorm, das Thema Building Information Modeling (BIM) wird mittlerweile umfassend in Planungssoftwares im Baubereich eingesetzt. Aber inwiefern ist BIM auch in Schallschutz-Softwares bereits im Einsatz? Zur Beantwortung dieser Frage beschäftigen sich die Autorinnen mit der Analyse kommerzieller Schallschutz-Softwares hinsichtlich ihrer Einbindung in einen offenen Datenaustausch im Sinne von open BIM sowie hinsichtlich ihrer Eignung für die Berechnung von Gebäuden in Holzbauweise.

1. BIM im Schallschutz

Der Einsatz durchgängiger digitaler Planungsprozesse soll die Planungsgenauigkeit und Kostensicherheit erhöhen. In der BIM-Methodik werden digitale Bauwerkinformationsmodelle erstellt, anhand derer die Planung des realen Gebäudes durchgeführt wird. Durch die Visualisierung und Verknüpfung der Informationen zu den Bauteilen wird der Informationsaustausch zwischen den Planer*innen begünstigt und Bau- bzw. Planungsfehler früher erkannt. Neben der Qualitätssteigerung der Projekte und der geplanten Gebäude sind weitere Vorteile der BIM-basierten Planung die Kostenreduktion über den gesamten Projektverlauf, die Zeitersparnis durch übersichtliche Planungsabläufe, die Verbesserung der Kommunikation und die Koordination zwischen Projektbeteiligten und Gewerken [1-3].

Die Vorteile bei der Nutzung von BIM zeigen sich insbesondere bei der Verbindung von BIM-Modellen mit weiteren Planungstools [4]. So können in einer früheren Planungsphase Analysen und Prognoseberechnungen zur Tragwerksplanung und dem bauphysikalischen Verhalten des Gebäudes erstellt und zwischen verschiedenen Varianten das Optimum ausgewählt werden.

1.1. Open BIM-Methodik

Als open BIM bezeichnet man eine Methode, bei der für den Austausch der Informationen und Modelle offene, herstellerneutrale Datenformate verwendet werden. Dabei ist es unerheblich, in welcher Autorensoftware das Gebäudemodell erzeugt wird und mit welcher Software die Fachplaner ihre Fachmodelle und Planungen erzeugen. Um Modelle zu übergeben wird daher auf das Format IFC (Industry Foundation Class) von *buildingSMART* zurückgegriffen. Daneben können noch weitere maschinenlesbare Dateien, Verknüpfungen zu Datenbanken (linked data) aber auch Dateien wie PDFs mit den Modellen übergeben werden. Hierfür ist die Nutzung eines CDE (common data environment) von großem Vorteil, mit dem auch modellbasierte Meldungen anhand von BCF (BIM Collaboration Format) ausgetauscht werden können.

Das digitale Gebäudemodell soll nicht nur den architektonischen Ansprüchen genügen, sondern auch mit Blick auf die Anforderungen der Fachplaner*innen modelliert werden. Die Modellqualität spielt hier eine entscheidende Rolle. Beim Export des Gebäudemodells in IFC sollte mit der MVD (model view definition) gearbeitet werden, die für die jeweilige Fachplanung am sinnvollsten ist. MVDs legen fest, welche Klassen des IFC-Schemas verwendet werden dürfen. Hier ist vorab festzulegen, in welchem Detaillierungsgrad die Fachplaner*innen die Modelle benötigen und welche Klassen in den Modellen enthalten sein

müssen. Zu detaillierte Modelle können ebenso zu Problemen führen wie Modelle mit zu geringen Informationen. Für die Prognose des Schallschutzes in Gebäuden bedeutet dies, dass Informationen zu Bauteilgeometrien, Räumen und Materialien im Gebäudemodell vorhanden sein müssen. Auch zusätzliche Bauteile wie Fenster und Türen sollten bei Bedarf enthalten sein. Im Holzbau ist zudem eine genaue Detaillierung der Stoßstellen zwischen Bauteilen eine wertvolle Information.

Gleichzeitig müssen Planungssoftwares die gegebenen Informationen auslesen können. Es entsteht erst dann ein Mehrwert durch die open BIM-Methodik, wenn die Übermittlung der Informationen automatisiert wird und manuelle Vorgänge deutlich reduziert werden.

1.2. Idealer Planungsprozess für den Schallschutz

Das kritischste im open BIM-Prozess sind die Schnittstellen zwischen Autoren- und Planungssoftwares sowie zwischen den unterschiedlichen Fachdisziplinen. Das Koordinationsmodell dient dazu, die Fachmodelle der verschiedenen Planer*innen zusammenzubringen und wird aus dem Architekturmodell generiert. BIM-Koordinator*innen erstellen die Modelle und integrieren die Daten von der Entwurfsplanung bis über die Bauphase hinweg. Auch für den Schallschutz wird ein Fachmodell benötigt, um Daten für die Planung zu extrahieren und zu generieren sowie die Ergebnisse modellbasiert zurückzugeben (Abbildung 1). An dieser Stelle kann das Fachmodell auch in ein CDE hinterlegt und Meldungen über Planungsfehler oder notwendigen Änderungen anhand von BCF übermittelt werden.

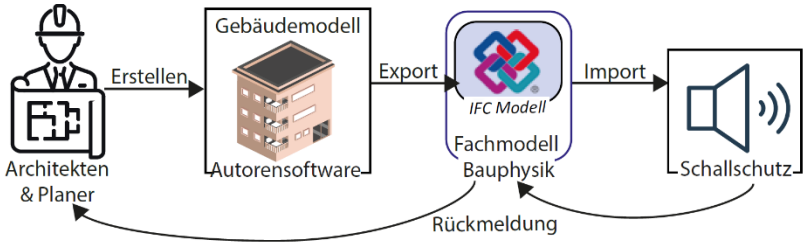


Abbildung 1: open BIM-Prozess für den Schallschutz

Alle verwendeten Tools müssen in der Lage sein, IFC-Daten in ausreichender Qualität zu schreiben und zu lesen, d.h. die Semantik und die übergebenen Informationen müssen für die weiteren Anwender*innen korrekt zuordenbar und nützlich sein. Eine Informationsflut nicht relevanter Informationen ist genauso unnütz wie ein Modell mit falscher Semantik wie z.B. angewandter Modellentitäten, fehlerhafter räumlicher Struktur etc.

Die Planungstools für die Prognose der Schalldämmung sollten in der Lage sein, verschiedene Bausituationen und Bauteilarten zu interpretieren und daraus korrekt nach Norm zu rechnen. Die Klarheit über die getroffenen Annahmen und den Berechnungsweg sind für Planungsingenieur*innen dabei unerlässlich. Für den Planungsprozess ist es zudem wichtig, wie die Ergebnisse ausgegeben und dokumentiert werden können.

Während für die Planung der Raumakustik bereits Lösungen in Autorensoftwares integriert sind [5-9], zeigt sich in der Literatur, dass die Schallschutzplanung nur schwer den Einzug in die BIM-Methodik schafft [10].

2. Planungstools Schallschutz

Die Eigenschaften und Aufgabenbereiche der erhältlichen Tools und Softwares für die Bauakustik unterscheiden sich stark voneinander. Einige Tools sind für die Schallübertragung von technischer Gebäudeausrüstung (*Geberit Schallschutztool*, *Kaldewei*, *Passivhaus Institut*) oder von Außenlärm (*dBel.Architect*, *Fensterblick*, *soundPLAN*) verfügbar oder für die Ermittlung der Schalldämmung eines einzelnen Bauteils (*INSUL*, *Rockwool Trittschall-Rechner*, *SoundLab AI*). Einige kostenlose Tools ermöglichen eine vereinfachte Berechnung des bewerteten Bau-Schalldämm-Maßes bzw. bewerteten Norm-Trittschallpegels (*Lignum*, *Rigips Schallschutzrechner 4.0*, *Ziegelrechner*). Andere kostenpflichtige Softwares ermöglichen eine detailliertere Eingabe der Eingangsparameter und somit die größten Möglichkeiten zur Berechnung (*AcouBAT*, *CadnaB*, *DIN 4109 Schallschutznachweis im Hochbau* von *M. Hanneforth*, *Hottgenroth Schallschutz 3D PLUS*, *SONarchitect*). Dabei sei

gesagt, dass die hier aufgeführte Liste nur einen Stand zur Zeit der Recherche zeigt und keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.
Für diesen Beitrag wurde eine Auswahl aus den kostenpflichtigen Softwares betrachtet. Die Mindestanforderung für die genauere Untersuchung war die Möglichkeit zur Berechnung der Luft- und Trittschalldämmung zwischen Räumen innerhalb eines ganzen Gebäudes. Es wurde geprüft, ob die Softwares in der Lage sind unterschiedliche Bauweisen und dabei insbesondere den Holzbau zu berechnen, ob sie modellbasiert arbeiten und BIM-fähig sind. Dabei wurde auch untersucht, ob sie besondere Kompetenzen im Bereich des Schallschutzes aufweisen, wie zum Beispiel unterschiedliche Berechnungsmöglichkeiten nach DIN 4109 oder ISO 12354 und Einstellungen nach ISO 12354-1 Anhang C.

Aufgrund dessen fiel die Auswahl für die Analyse auf *SONarchitect* sowie *CadnaB*, da beide Softwares die Eingabe von Holzbauteilen und eine Berechnung in Leichtbauweise nach ISO 12354 ermöglichen. Zudem wurde *AcouBAT* ausgewählt, da es durch die Einbindung des Schallschutzes in einen open BIM-Workflow hervorsticht.
Bei der Recherche fiel noch die Firma *Hottgenroth* auf, bei der einige Softwaretools als 3D PLUS Produkte einen BIM-Import mit einem extra Modul *HottCAD* ermöglichen. Das zugehörige Schallschutztool soll den Schallschutznachweis nach DIN 4109 ermöglichen, wurde für diese Testreihe jedoch nicht mehr getestet, da es laut Aussage der Firma *Hottgenroth* keine Holzbaudatenbank enthält und keine Berechnung von Elementen in Holzbauweise ermöglicht [11].

2.1. Bewertungskriterien

Im Folgenden werden die drei ausgewählten Softwares vorgestellt. Nach einer kurzen allgemeinen Beschreibung werden sie anhand der folgenden Bewertungskriterien aus Tabelle 1 untersucht. Die Kriterien unterteilen sich in die Kategorien Berechnungsmethodik, BIM-Kompatibilität, Datengrundlage und Nutzerfreundlichkeit & Ergebnisausgabe.

Tabelle 1: Bewertungskriterien für die Softwareanalyse

Kriterium	**Erläuterung/ Details**
Berechnungsmethodik	

Berechnung	– Welche Berechnungsverfahren sind hinterlegt?
	  – DIN 4109 [12-14]
	  – DIN EN ISO 12354 [15-18] (vereinfachtes Verfahren, frequenzabhängiges Verfahren)

Holzbau	– Welche Prognoseverfahren sind hinterlegt für Holzleichtbau, Massivholzbau?
Stoßstellendämm-Maße	– Wie werden die Stoßstellendämm-Maße ermittelt? – Kann auf die Ausführung der Stoßstelle Einfluss genommen werden (Kopplung, Elastomere, durchlaufende Bauteile)? – Ist die Eingabe von Stoßstellendämm-Maßen möglich (Einzahlwerte oder frequenzabhängig)?
BIM-Kompatibilität	
Geometrie-Import	– Welche Datenformate können importiert werden (IFC2x3, IFC4, gbXML)? – Welche Geometrieinformationen werden übernommen?
IFC-Semantik	– Werden semantische Informationen wie Bauteiltyp (Decke, Wand, Fassade) und Materialangaben übernommen?
IFC-Räume	– Werden Räume und Zonen mit Namen und Eigenschaften übernommen?

Kriterium	Erläuterung/ Details
Datengrundlage	
Bauteildatenbanken	– Welche Bauteildatenbanken sind hinterlegt (Normen [19-23], Bauteilkataloge von Herstellern, Messdaten)?
Holzbauteile	– Sind Holzbauteile vorhanden (Leicht- und Massivholzbau)?
Benutzerdefinierte Bauteile	– Können eigene Bauteile angelegt werden? – Können diese projektübergreifend gespeichert bzw. exportiert werden?
Bauteil-Import	– Können Bauteile aus anderer Software oder anderen Datenbanken importiert werden?
Nutzerfreundlichkeit und Ergebnisausgabe	
Nachvollziehbarkeit	– Ist die Berechnung bzw. sind die verwendeten Eingangsparameter nachvollziehbar? – Sind Zwischenergebnisse einsehbar? – Welche Berechnungsergebnisse werden ausgegeben?
Ergebnisbericht	– In welchem Dateiformat kann ein Ergebnisbericht ausgegeben werden? – Welche Informationen sind enthalten?
User-Interface	– Ist die Oberfläche intuitiv und leicht zu bedienen?

2.2. AcouBAT by CYPE 2024.f

Die Firma *CYPE Ingenieros, S.A.* vertreibt Planungssoftwares für den gesamten Baubereich, u.a. für Tragwerksplanung (*CYPECAD*), TGA-Planung (*CYPEPLUMBING*), Wärme- und Feuchteschutz (*CYPETHERM*) und Brandschutzplanung (*CYPEFIRE*) bis hin zu Managementtools (*Arquimedes*, *CYPE Cost Estimator*). *AcouBAT by CYPE* steht für die Prognose der Luft- und Trittschalldämmung zwischen Räumen und gegen Außenlärm zur Verfügung, sowie zur Berechnung der Installationsgeräusche und der Schallabsorption. Die Software wurde von *CYPE Ingenieros* und der französischen öffentlichen Forschungseinrichtung *CSTB (Scientific and Technical Centre for Building)* entwickelt.
Alle Tools von *CYPE* sind für den open BIM-Workflow ausgelegt und verwalten die Gebäudemodelle über die Plattform *BIMserver*[1], ein open Source Projekt gefördert von der EU (*European Union's Horizon 2020, Grant Agreement No 957128*). In jedem Projekt können neben mehreren IFC-Modellen auch analytische Modelle hinterlegt werden.

AcouBAT berechnet die Schalldämmung zwischen horizontal, vertikal und diagonal angrenzenden Räumen. In den allgemeinen Einstellungen können die gewünschten Zielgrößen ausgewählt sowie verschiedene Raumtypen und deren Wechselwirkung inklusive zugehörigerer Anforderungen definiert werden.
Die Benutzeroberfläche gliedert sich in drei Hauptbereiche: Elementbaumstruktur, 3D-Modell-Ansicht und Daten/ Bearbeiten von Elementen. Die Eingabe ist in zwei Registerkarten aufgeteilt, *Modell* und *Analyse*. Im Bereich *Modell* werden den Räumen und Bauteilen des eingelesenen IFC-Modells die entsprechenden Eigenschaften zugewiesen; unter *Analyse* können die Berechnungsergebnisse raumweise eingesehen werden.

Berechnungsmethodik
Das in *AcouBAT* hinterlegte Berechnungsverfahren basiert auf der ISO 12354 Teile 1-3, 5 und 6. Für die Prognose der Luft- und Trittschalldämmung wird das detaillierte Berechnungsverfahren verwendet. *AcouBAT* ermöglicht die Berechnung von Bauteilen in Massiv- und Leichtbauweise.
AcouBAT erkennt Stoßstellen automatisch und ermittelt das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} anhand der flächenbezogenen Massen mit eigenen Formeln, die sich an der ISO 12354 orientieren, um die Bauweise in Frankreich besser abzubilden [24]. Es können aktuell noch keine elastischen Zwischenschichten eingefügt werden. Dafür ist es möglich, einzelne Komponenten aus den Stoßstellen zu entfernen und die Verbindungskante l_{ij} anzugeben.

[1] https://bimserver.center/en

BIM-Kompatibilität

AcouBAT ist grundsätzlich open BIM-fähig. Abbildung 2 zeigt den Importprozess: die IFC-Datei wird mit dem Tool *IFC Uploader* in das CDE *BIMserver.center* hochgeladen und anschließend im *Open BIM Analytical Tool* in ein analytisches Modell umgewandelt. Auch das analytische Modell wird nach seiner Erstellung im CDE gespeichert. *AcouBAT* kann dann auf die IFC-Datei und das analytische Modell zugreifen und mit diesen Informationen das Modell für die akustische Planung anlegen (Abbildung 2 rechts).

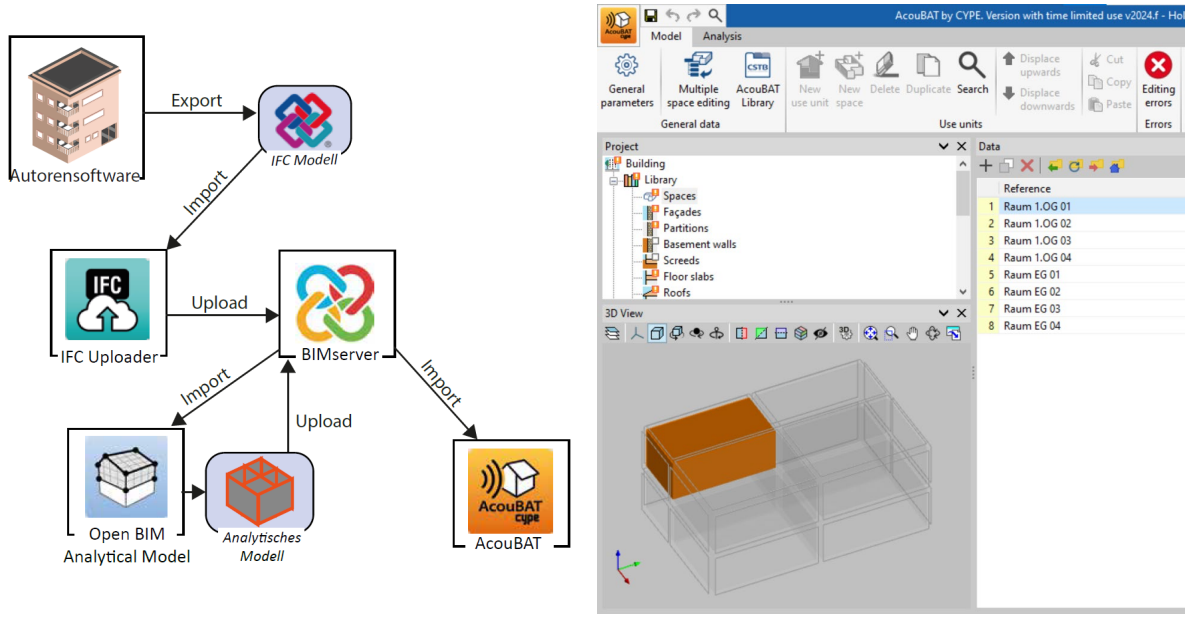


Abbildung 2: IFC-Import in AcouBAT by CYPE

Anhand der IFC-Datei werden die Gebäudegeometrie (Kanten und Raumbegrenzungen) erstellt und semantische Informationen wie Bauteiltypen und Raumbezeichnungen hinzugefügt. Nutzer*innen müssen dann aus der Datenbank nur jeweils ein Bauteil pro Bauteiltyp zuordnen. Dies funktioniert für Räume nicht; hier müssen Nutzer*innen jedem Raum einen Raumtyp zuweisen.

CYPE stellt für einen reibungslosen Ablauf Modellierrichtlinien[2] zur Verfügung, die erläutern, welche IFC-Entitäten in welchen Fällen genutzt werden müssen. Diese Erläuterungen helfen dabei, die Qualität des IFC-Modells zu überprüfen und die Anforderungen für einen optimalen Prozess zu definieren. Bisher können keine akustischen Vorsatzschalen, wie Estriche oder Unterdecken, die als *IfcCovering* definiert werden, eingelesen werden. Dafür können bei korrekt hinterlegten Werten in *Qto SpaceBaseQuantities* Raumflächen und -volumina automatisch ausgelesen werden.
Das Prozedere für den Import ist recht aufwendig, da ein separates Tool für die Erzeugung des analytischen Modells benötigt wird. Dieses Modell kann jedoch für alle Tools von *CYPE* verwendet werden, was für manche Planungsbüros wiederum einen großen Vorteil darstellen kann.

Datengrundlage

AcouBAT verfügt über zwei Datenbanken mit Messdaten von Massiv- und Leichtbauteilen, die von dem *CSTB* verwaltet werden: eine für generische Produkte und eine für kommerzielle. Die Inhalte können nur durch Kopieren und Bearbeiten bereits bestehender Bauteile durch eigene Bauteile ergänzt werden. Benötigte Angaben sind die Dicke, flächenbezogene Masse sowie der Absorptionskoeffizient und das Schalldämm-Maß bzw. der Trittschallpegel als Einzahlwert oder frequenzabhängige Eingangsdaten. Es muss dabei angegeben werden, ob es sich um Labor- oder Baumessungen handelt.

[2] https://learning.cype.com/en/faq/ifc-requirements-for-the-analytical-model-generator/

Werte für das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} werden von der Software berechnet und können nicht geändert werden. Nutzer*innen können die Werte in den detaillierten Ergebnistabellen einsehen, die nach der Berechnung verfügbar sind.

Nutzerfreundlichkeit und Ergebnisausgabe
Neben dem in der Software zugänglichen Benutzerhandbuch wurde auf Nachfrage beim *CYPE*-Support das technische Handbuch von *CSTB* [24] zur Verfügung gestellt, aus dem mehr Hintergründe zum Berechnungsverfahren hervorgehen.

Zur Orientierung wir das Gebäudemodell immer dargestellt. Allerdings können die Bauteile nur im Elementbaum und nicht direkt im Modell ausgewählt werden. Ein nutzerfreundlicheres Handling des BIM-Modells könnte in Zukunft die Attraktivität der Software weiter steigern, da derzeit die Softwareoberfläche eher tabellarisch gehalten ist. Die Gesamt- und Zwischenergebnisse der einzelnen Übertragungswege sowie die ermittelten K_{ij} werden tabellarisch und graphisch ausgegeben. Als Dateiformate für den Export stehen XLS, PDF, DOCX, HTML, RTF und TXT zur Verfügung.

2.3. CadnaB 2024 von DataKustik

CadnaB von der *DataKustik GmbH* ist der Nachfolger der damaligen Software *Bastian* und berechnet die Luft- und Trittschallübertragung zwischen Räumen innerhalb von Gebäuden sowie den Schallschutz gegen Außenlärm. *DataKustik* vertreibt zusätzlich die Software *CadnaA* zur Berechnung, Darstellung, Beurteilung und Prognose von Umgebungslärm sowie *CadnaR* zur Berechnung und Beurteilung von Schall in Räumen und des Immissionsschutzes am Arbeitsplatz.

CadnaB ist sehr übersichtlich gestaltet. Beim Anlegen eines neuen Projektes kann zwischen einem horizontalen oder vertikalen Raumpaar, einem einfachen Gebäude oder einem leeren Projekt gewählt werden. Bereits in diesem Startfenster können die Berechnungsnorm, die Konstruktion für das Trennbauteil sowie die Standardkonstruktionen für die angrenzenden Bauteile und die grundlegende Geometrie (außer bei *leeres Projekt*) festgelegt werden. Die Benutzeroberfläche gliedert sich in Symbolleiste, Zeichenfläche und einen Menü-Bereich, in dem die verschiedenen Anzeige-Modi (Projekt, Konstruktionen, Nutzungen, Schallpegel und Ergebnisse) ausgewählt werden können und die entsprechenden Details dazu angezeigt werden.
Die Modellerstellung basiert auf einer 2D-Zeichnung und dem Anlegen von Stockwerken, die dupliziert werden können. Die Wandstärken bleiben in der Zeichnung unberücksichtigt, weshalb lichte Maße als Achsmaße anzusetzen sind. Zur Überprüfung der grundlegenden Geometrie kann das Gebäude in einem separaten Fenster in einer openGL 3D-Ansicht angezeigt werden. Darin können auch Bauteile direkt ausgewählt und ihre Eigenschaften angepasst werden.

Berechnungsmethodik
In *CadnaB* ist zum einen die Berechnung nach DIN 4109 verfügbar. Zum anderen unterstützt *CadnaB* die Berechnung nach ISO 12354 Teile 1 bis 3. Dabei kann zwischen dem vereinfachten Modell mit Einzahlangaben und dem detaillierten Berechnungsmodell in Terzbandbreite gewählt werden. Beim frequenzabhängigen Verfahren kann für die Bestimmung der Körperschall-Nachhallzeit in-situ zwischen der vereinfachten Korrektur und der ausführlichen Berechnung nach ISO 12354 Teil 1 Anhang C gewählt werden.
Es kann aus diversen Zielgrößen für die Luft- und Trittschallübertragung (sowie für die Schallübertragung von außen nach innen) gewählt werden. Bei Berechnung nach DIN 4109 ist unter Angabe des Gebäudetyps zwischen der automatischen Anforderungsdetektion an den Mindestschallschutz bzw. den erhöhten Schallschutz zu wählen. Bei der Berechnung nach DIN 4109 und ISO 12354 können darüber hinaus Anforderungen für Deutschland u.a. nach VDI 4100 [25] oder DEGA 103 [26] gewählt werden oder nach weiteren, internationalen Normen. Es können auch für die einzelnen Übertragungssituationen Anforderungen selbst angelegt werden.

CadnaB ermöglicht die Berechnung von Bauteilen in Massiv- und Leichtbauweise. Standardmäßig wird der Stoßstellentyp in *CadnaB* automatisch erkannt und das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} je nach ausgewähltem Berechnungsverfahren softwareseitig berechnet. Es kann für jede Wand für alle vier Seiten zwischen den Anschlussarten *direkt*, *elastische Zwischenlage* und *entkoppelt* gewählt werden.

Darüber hinaus kann durch ein *manual overwrite* K_{ij} für die einzelnen Übertragungswege Df, Fd und Ff für jede Stoßstelle durch die Nutzer*in händisch angepasst werden (Abbildung 3). Zulässige Werte liegen derzeit zwischen -20 dB und 20 dB; Werte außerhalb des Intervalls werden automatisch auf die Intervallgrenzen korrigiert. *Kein Eintrag* bedeutet, dass die jeweilige Flanke nicht berechnet wird. Bei K_{ij} = 0 handelt es sich um eine gültige Eingabe, die nicht der Eingabe *kein Eintrag* entspricht.[3]
Durch dieses *manual overwrite* können zusätzlich Bauteile in Massivholzbauweise berechnet werden.

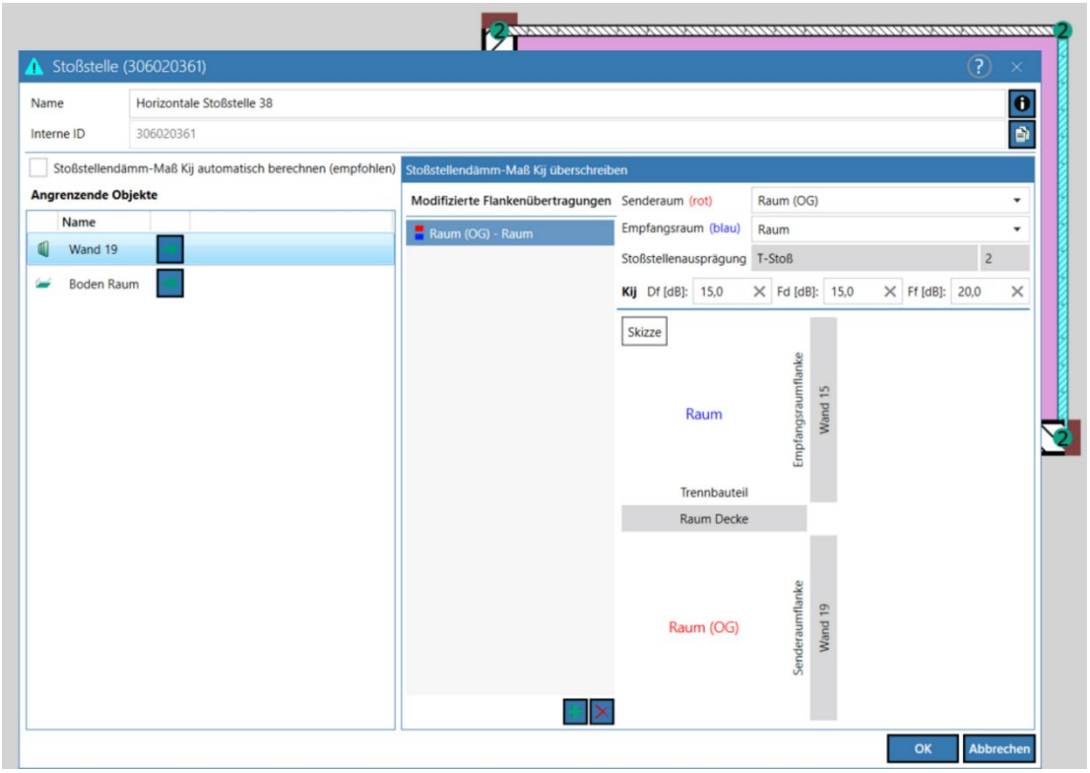


Abbildung 3: Manuelle Eingabe von Stoßstellendämm-Maßen in CadnaB

BIM-Kompatibilität

In *CadnaB* ist kein Import digitaler Gebäudemodelle im IFC-Format möglich. Die Grundrisse der Gebäude werden als Vorlage aus PDF- oder weiteren Bild-Dateien (PNG, BMP, JPEG, TIFF, GIF) in die 2D-Arbeitsumgebung importiert und anschließend nachgezeichnet. In der Software *CadnaR* von *DataKustik* ist der Import von IFC4-Dateien bereits möglich. Da die Anforderungen an die BIM-Modelle jedoch für jede dieser Softwares sehr unterschiedlich sind, wurde der Import nicht parallel in *CadnaB* umgesetzt, ist aber für die Zukunft angedacht.

Datengrundlage

Es stehen verschiedene Datenbanken für die Bauteilauswahl zur Verfügung: In der *CadnaB*-Datenbank sind berechnete, frequenzabhängige Werte in Terzbändern für einschalige Massivwände und -decken sowie für zweischalige Massivwände enthalten. Zudem stehen Daten auf Basis der DIN 4109 Beiblatt 1 für Holz- und Skelettbau sowie Außenbauteile zur Verfügung, sowie Werte aus weiteren Richtlinien wie der SIA D 0189 [27], der CTE [28],

[3] http://doku.datakustik.com/CadnaB/de/index.html#rhhlterm=sto%C3%9Fstelle&rhsyns=%20&t=CadnaB%2FKapitel_4_-_CadnaB-Objekte%2FStossstelle%2FStossstelle.htm&rhsearch=sto%C3%9Fstelle

dem Bericht Holz- und Skelettbau des PTBs [29] uvm. Außerdem sind Herstellerdaten u.a. von *Saint-Gobain Isover* und *Rigips GmbH* verfügbar. Zudem wird die externe Materialdatenbank *SOAB Database* von *SONUSOFT* bereitgestellt.

Eine Importfunktion von XML-Dateien wird aktuell für Konstruktionsdaten aus der Software *INSUL* angeboten, einem Programm von *Marshall Day Acoustics* zur Berechnung des Schalldämm-Maßes oder des Trittschallpegels von trennenden Bauteilen.
Darüber hinaus ist die direkte Eingabe neuer Konstruktionen und die projektübergreifende Verwendung möglich. Notwendige Angaben sind Bauteilart und -name sowie die Bauteildicke und flächenbezogene Masse. Bei der Berechnung nach ISO 12354 sind zudem Koinzidenzgrenzfrequenz und innerer Verlustfaktor sowie Schalldämm-Maß bzw. Trittschallpegel in Terzbändern oder als Einzahlwert einzugeben. Bei der Berechnung nach DIN 4109 können entweder Einzahlwerte angegeben oder Eingabemasken genutzt werden, mit denen anhand des Vorgehens in den Bauteilkatalogen der DIN 4109 Teile 32, 34 und 35 [21-23] sowie Teil 35/A1 [30] Bauteildaten ermittelt werden können.

Nutzerfreundlichkeit und Ergebnisausgabe
Wie bereits eingangs erwähnt ist die Software sehr übersichtlich gestaltet. Es gibt einige Beispieldateien inkl. Demo-Tutorial und eine ausführliche online-Hilfe, die sich über jedes Fenster der Software themenspezifisch erreichen lässt (z.B. Konstruktion, Stoßstelle, Ergebnisse etc.) und so die Bedienung zusätzlich erleichtert.

Im Ergebnis-Dialog werden die Endergebnisse der Luft- und Trittschallberechnung entsprechend der voreingestellten Zielgrößen inkl. Vergleich mit den gewählten Anforderungen angezeigt. Das zugehörige Raumpaar wird in der 3D-Ansicht dargestellt. Außerdem können die Teilergebnisse für das Trennbauteil und die Flanken direkt eingesehen werden. Der Stoßstellentyp wird über eine softwareinterne Nummer angezeigt. Die Stoßstellendämm-Maße können nicht direkt eingesehen werden.
Das Ergebnis der Berechnung kann mithilfe einer Auralisierung hörbar gemacht werden.

Alle Objekttabellen (Wände, Stoßstellen etc.) lassen sich als CSV-Datei exportieren. Ein Ergebnisbericht mit den verwendeten Konstruktionsdaten, allen Ergebnissen für die Direkt- und Flankenübertragung (Einzahlwerte) sowie der Gesamtübertragung (frequenzabhängig) inkl. Frequenzdiagramm kann als DOCX-Datei exportiert werden.
Des Weiteren lässt sich ein Berechnungsprotokoll als XLSX-Datei ausgeben, worin bei detaillierter Berechnung neben den Eingangsdaten (Geometrie und frequenzabhängige Konstruktionsdaten) die frequenzabhängigen Ergebnisse aller Pfade und die Stoßstellendämm-Maße für jede Übertragungssituation separat aufgelistet werden.

2.4. SONarchitect ISO v3.1.11 von Sound of Numbers

SONarchitect ISO von der spanischen *Sound of Numbers S.L.* ist eine Software zur Berechnung der Luft- und Trittschallprognose zwischen Räumen sowie für die Prognose der Schallübertragung von Außenlärm nach innen und von Räumen ins Freie.[4] Außerdem kann die Schallabsorption in Räumen ermittelt werden. *SONarchitect* kann in Deutschland über die *Akustikbüro K5 GmbH* bezogen werden.

Die Software ist sehr übersichtlich in sechs Modi aufgebaut (Zeichenmodus, Materialzuweisung, Außenlärm, Nutzungseinheiten, 3D-Modell und Berechnung). Die Benutzeroberfläche gliedert sich in Symbolleiste, Zeichenfläche und Menü-Bereich, in dem je nach Modus die Bauteilkonstruktionen oder Berechnungsergebnisse aufgelistet sind bzw. die Einstellungen zum Außenlärm getätigt werden können.

Bei Anlegen eines neuen Projektes können bereits alle Anforderungen festgelegt sowie die Standardmaterialien zugewiesen werden, sofern sie bereits in der Datenbank vorhanden sind. Die Modellerstellung erfolgt anhand von 2D-Zeichnungen und dem Anlegen von Stockwerken und kann anhand eines 3D-Modells überprüft werden.

[4] https://www.k5-akustik.de/software/sonarchitect-iso/

Berechnungsmethodik
Das in *SONarchitect* hinterlegte Berechnungsverfahren basiert auf der ISO 12354 Teile 1 bis 4 . Es wird das detaillierte Berechnungsverfahren verwendet. Für die Umrechnung auf in-situ-Werte kann zwischen Näherung und Berechnung von $T_{s,lab}$ sowie $T_{s,situ}$ gemäß Teil 1 Anhang C und zwischen Verwendung des internen Verlustfaktors gemäß Bauteildatenbank oder Näherung η_{int} = 0,01 gewählt werden.
Es können länderspezifische Schallschutzklassen inkl. Anforderungen eingesehen werden, z.B. für Deutschland gemäß VDI 4100 [25]. Für den Vergleich der Berechnungsergebnisse sind Anforderungen zwischen den jeweiligen Raumtypen unter Angabe der Zielgröße und des Grenzwertes festzulegen.

SONarchitect ermöglicht die Berechnung von Bauteilen in Massiv- und Leichtbauweise. Die Unterscheidung erfolgt beim Anlegen des Bauteils als Leichtbau-Element.
Die Stoßstellen werden automatisch aufgrund der Geometrie- und Materialzuordnung von der Software gewählt und K_{ij} nach ISO 12354-1 Anhang E bzw. F berechnet. Die Berechnung von Stoßstellen zwischen Brettsperrholz-Bauteilen nach ISO 12354-1 Anhang F.3.2 ist aktuell noch nicht hinterlegt. Es besteht die Möglichkeit, elastische Stöße zwischen Decken oder Wänden zu definieren. Außerdem kann beim Anlegen von Wänden in der Datenbank voreingestellt werden, dass diese automatisch elastisch an Boden und Decke angeschlossen werden.

BIM-Kompatibilität
In *SONarchitect* ist kein Import von IFC-Dateien möglich. Gebäudegrundrisse können als DXF-Dateien importiert und im 2D-Zeichenmodus nachgezeichnet werden. Identische Stockwerke müssen durch Angabe der Anzahl an Wiederholungen nicht mehrfach gezeichnet werden. Einzelne Deckenelemente können beispielsweise für Aufzugsschächte oder Treppenhaustürme durch einen Klick entfernt werden.
Die Softwarehersteller stellen bisher eine sehr wechselhafte Qualität der zu importierenden Gebäudemodelle fest und wünschen sich eine höhere Zuverlässigkeit von IFC. Bis dahin sehen sie das Nachzeichnen als effizienter und vor allem weniger fehleranfällig an. Für die Zukunft wird nach Möglichkeiten gesucht, auch auf die semantischen Informationen in der IFC-Datei zuzugreifen, um die Materialzuweisung zu vereinfachen. Der zeitliche Rahmen dafür ist noch unklar [34].

Datengrundlage
Die Bauteildatenbank ist durch die Einteilung in Bauteiltyp und -untertyp klar strukturiert. Sie enthält Massivbau-, Holzleichtbau- und Massivholzbaukonstruktionen, die auch abgeändert werden können. Zudem wird die externe Materialdatenbank *SOAB Database* von *SONUSOFT* bereitgestellt und eine Importmöglichkeit für Konstruktionsdaten aus der Software *INSUL* angeboten. Darüber hinaus können eigene Bauteile manuell hinzugefügt werden. Es können auch mehrschichtige Aufbauten durch Zusammensetzen der einzelnen Schichten eingegeben werden. Es besteht außerdem die Möglichkeit Bauteildaten als XML-Dateien zu im- oder exportieren.

Nutzerfreundlichkeit und Ergebnisausgabe
SONarchitect ist sehr übersichtlich gestaltet. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt mit Hilfe eines Ergebnisbaums, der nach den verschiedenen Geschossen und Senderäumen gegliedert ist. Bei der Wahl eines Raumpaares oder eines Übertragungsweges werden diese parallel im 3D-Modell angezeigt.

In der online-Hilfe werden keine Hintergründe zur Berechnung erläutert und es wird auch kein technisches Handbuch zur Verfügung gestellt, jedoch sticht der Informationsgehalt in der Ergebnisausgabe der Software hervor. Es werden alle frequenzabhängigen Zwischen- und Berechnungsergebnisse graphisch und tabellarisch ausgegeben und die verwendeten Stoßstellentypen inkl. Formeln zur Ermittlung von K_{ij} angezeigt (Abbildung 4). Über den Berichtgenerator kann eine PDF-Datei ausgegeben werden, die über ein Auswahlmenü individuell zusammengestellt werden kann. Zudem können einzelne Ergebnis-Blätter direkt über die Ergebnisausgabe gedruckt werden.

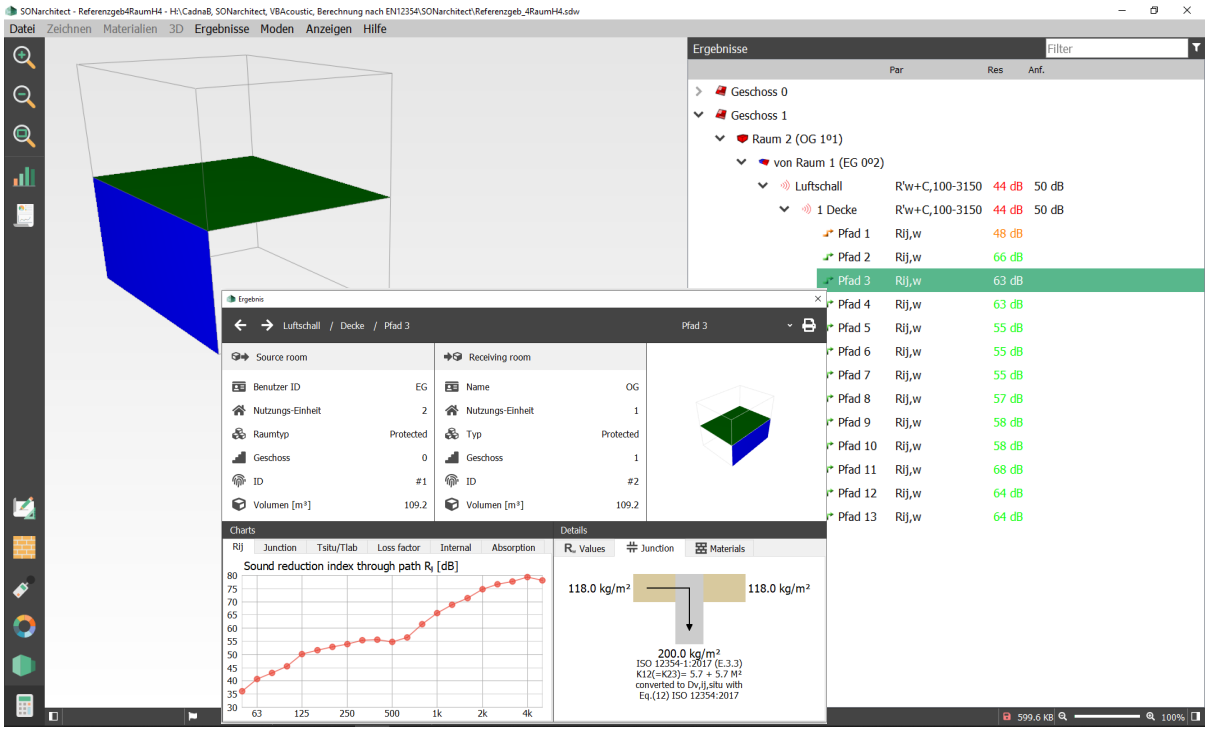


Abbildung 4: Ergebnisausgabe in SONarchitect

3. Idee für die Zukunft

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, ermöglichen die derzeitigen Schallschutz-Softwares nur sehr vereinzelt an BIM angepasste Arbeitsabläufe. Eine Anbindung an BIM kann auch für die Bauakustik immer in zwei Teilen gedacht werden: Geometrie und Semantik. Der Mehrwert bei der Übernahme der Geometrie aus BIM-Modellen besteht darin, dass die Gebäude nicht erneut modelliert werden müssen. Hierbei hat jede Fachplanung ihre eigenen Besonderheiten in der Informationstiefe und Darstellungsart der Geometrie. Ob Bauteile beispielsweise nur noch als Flächen abgebildet werden, als vereinfachte Begrenzungsboxen oder detaillierte Tesselierung ist von der zu lösenden Aufgabe abhängig und bleibt eine Herstellerentscheidung.

Neben der Geometrie beinhaltet die IFC-Datei semantische Informationen. Diese können die Gebäudehierarchie wie Geschosse, Räume und Bauteilpositionen im Gebäude betreffen, aber auch Informationen über Räume und Bauteile selbst. Aus Räumen kann die Information über ihre Funktion, Zugehörigkeit zu einer Nutzungseinheit und ihre angrenzenden Bauteile verwendet werden. Bauteile können vor allem Informationen über ihren Schichtaufbau, zugehörige Vorsatzschalen und ihre Materialien enthalten. In eingeschränkter Art können Verbindungen zwischen Bauteilen hinterlegt sein.

Zusätzlich können jedem Bauteil oder jedem Raum in einer IFC-Datei weitere Verknüpfungen zu CDE, Datenbanken oder externen Dateien wie XML oder JSON gegeben werden. Diese Informationen ergänzen die Möglichkeiten, Eigenschaften in *PropertySets* einzugeben, um ein Vielfaches.

Im *Labor für Schallmesstechnik* der *TH Rosenheim* werden Holzbaukonstruktionen analysiert und an der Berechnungsmethodik für den Holzbau geforscht. Dabei entstand das frei verfügbare, Excel-basierte Tool *VBAcoustic*[5], welches laufend mit neuen Forschungsergebnissen erweitertet wird. Dazu gehören zum Beispiel Bauteilkataloge mit Holzbauteilen, die in die DIN 4109 einfließen. In einer Version wurde an einer Schnittstelle zum digitalen Gebäudemodell gearbeitet. Ziel war es nicht, einen IFC-Viewer in Excel zu integrieren.

[5] https://www.th-rosenheim.de/die-hochschule/fakultaeten/fakultaet-fuer-angewandte-natur-und-geisteswissenschaften/personen/professoreninnen/prof-dr-ing-andreas-rabold

Daher wurde nicht die Geometrie, sondern Semantik importiert. Dazu wurde eine Datenschnittstelle erzeugt, mit der Daten aus dem Gebäudemodell aus einer JSON-Datei ausgelesen werden. Die JSON-Datei kann mit Hilfe eines Tools erzeugt werden, das als prototypische Anwendung die Stoßstellensituation eines ausgewählten Bauteils in einer IFC-Datei erkennt. In dieser Datei werden die flankierenden Bauteile, die Bauteilabmessungen sowie die Stoßstellentypen hinterlegt. Der Prototyp wurde im Rahmen einer Dissertation erstellt [31-33]. Derzeit wird zusätzlich an der Möglichkeit gearbeitet, diese Datei mithilfe eines *Revit* Plug-Ins zu erzeugen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein Überblick über unterschiedliche Softwares zur Berechnung der Luft- und Trittschalldämmung in Gebäuden gegeben. Dazu wurden *AcouBAT by CYPE Ingenieros, S.A.*, *CadnaB* von der *DataKustik GmbH* und *SONarchitect ISO* von *Sound of Numbers S.L.* näher untersucht.
In allen Softwares sind verschiedene Berechnungsverfahren implementiert, wodurch eine Berechnung von Gebäuden in Holzbauweise grundsätzlich möglich ist. Bauteile in Massivholz- oder Holzleichtbauweise sind in den softwareinternen Datenbanken meistens bereits vorhanden und können auch manuell ergänzt werden. Alle Softwares rechnen zudem frequenzabhängig. Dies ist für den Holzbau besonders wichtig, um eine Beurteilung der Bausituation separat im tiefen und hohen Frequenzbereich zu ermöglichen. Für den Holzbau relevant ist außerdem die korrekte Eingabe der Stoßstellen über K_{ij} oder $D_{v,ij,n}$. Die Erkennung von Stoßstellen ist in allen Softwares automatisiert und die Berechnung nach Norm grundsätzlich hinterlegt, wobei teilweise softwareinterne Anpassungen integriert sind. Elastische Zwischenschichten können in *CadnaB* und in *SONarchitect* eingefügt werden. Darüber hinaus ermöglicht nur *CadnaB* eine manuelle Eingabe von Stoßstellendämm-Maßen in Form von Einzahlwerten in einem bestimmten Intervall.
Die Einbindung in einen open BIM-Planungsprozess steckt im Bereich der Schallschutz-Softwares noch in den Kinderschuhen. *AcouBAT* ermöglicht als einzige Software den Import eines digitalen Gebäudemodells als IFC-Datei. Dabei werden einige semantische Informationen wie die Raum- und Bauteilbezeichnung übernommen, aber keine Materialangaben oder Werte aus *PropertySets*. In allen Softwareanwendungen müssen Nutzer*innen die Bauteile händisch aus Bauteilkatalogen ermitteln.

Das Tool *VBAcoustic* der *TH Rosenheim* ist zu Forschungszwecken wie z.B. zum Erarbeiten neuer Berechnungsverfahren sowie zur Untersuchung von Schnittstellen gedacht. Es erhebt nicht den Anspruch einer perfekten alltagstauglichen Software, sondern soll Möglichkeiten der Umsetzung aufzeigen. Die Integration in den open BIM-Prozess wird in den nächsten Jahren durch das *Labor für digitales Planen und Bauen* der *TH Rosenheim* vorangetrieben werden. Durch die Arbeit in Gremien des *VDI* und *buildingSMART* sollen die Möglichkeiten open BIM in der Bauphysik zu nutzen vorangetrieben werden.

Der open BIM-Ansatz bietet viele Möglichkeiten, den Daten- und Informationsaustausch effizienter und vor allem zuverlässiger zu gestalten. Um das zu gewährleisten, muss seitens der Hersteller von Autorensoftware die Qualität der Gebäudemodelle im IFC-Format gleichbleibend hoch werden. Ihrerseits müssen die Hersteller von Planungssoftwares sich aber auch mit dem Thema auseinandersetzen und ihre Anforderungen an IFC-Dateien formulieren. Für Holzbauer*innen und Bauphysiker*innen ist die Mitarbeit in Gremien eine gute Möglichkeit, ihr fachliches Wissen für den Aufbau von Richtlinien und Standardisierungen weiterzugeben.

Die Kombination aus BIM und Holzbau und Schallschutz ist eine besondere Herausforderung für alle Planungsbeteiligten, ebenso wie für die Softwarehersteller. Es wurde gezeigt, dass BIM-Methodik mehr als nur der Import von 3D-Modellen ist. Die Arbeit mit einer 3D-Darstellung von Gebäudemodellen kann für die Ingenieur*innen von Nutzen sein, sollte aber zusätzlich mit einem Mehrwert durch semantische Informationen begleitet sein.

5. Literatur

[1] Y. Arayici, F. Khosrowshahi, A. Marshal Ponting, and S. Mihindu, «Towards Implementation of Building Information Modelling in the Construction Industry» in Fifth International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-V), Istanbul, Turkey, 2009.

[2] M. C. Georgiadou, «An overview of benefits and challenges of building information modelling (BIM) adoption in UK residential projects», Construction Innovation, vol. 19, no. 3, pp. 298–320, 2019.

[3] N. Jung, T. Häkkinen, and M. Rekola, «Extending Capabilities of BIM to support per-formance based design», Electronic Journal of Information Technology in Construction, 2018.

[4] B. Manzoor, I. Othman, and J. C. Pomares, «Digital Technologies in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry-A Bibliometric-Qualitative Literature Review of Research Activities» International journal of environmental research and public health, vol. 18, no. 11, 2021.

[5] A. Giglio, I. Paoletti, and M. Zheliazkova, «Performance-Based Design Approach for Tailored Acoustic Surfaces» in Research for Development, Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment, 2020.

[6] B. Peters, J. Nguyen, and R. Omar, «Parametric Acoustics: Design techniques that integrate modelling and simulation» in EuroNoise, Madeira, Portugal, 2021.

[7] M. Sušnik, L. C. Tagliabue, and M. Cairoli, «BIM-based energy and acoustic analysis through CVE tools», Energy Reports, 2021.

[8] Y. Tan, Y. Fang, T. Zhou, Q. Wang, and J. C. Cheng, «Improving Indoor Acoustics Performance of Concert Halls Using Building Information Modeling», in Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), Taipei, Taiwan, 2017.

[9] C. Wu and M. J. Clayton, «BIM-Based Acoustic Simulation Framework» in 30th International Conference of CIB W78, Beijing, China, 2013.

[10] E. Badino, L. Shtrepi, and A. Astolfi, «Acoustic Performance-Based Design: A Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice», Acoustics, vol. 2, no. 2, pp. 246–278, 2020.

[11] C. Winnen, Firma Hottgenroth, Telefonat am 27.02.2024.

[12] DIN 4109-1:2018-01, Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen, Berlin, Jan. 2018.

[13] DIN 4109-2:2018-01, Schallschutz im Hochbau – Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen, Berlin, Jan. 2018.

[14] DIN 4109-5:2020-08, Schallschutz im Hochbau – Teil 5: Erhöhte Anforderungen, Berlin, Aug. 2020.

[15] DIN EN ISO 12354-4:2017 – Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 4: Schallübertragung von Räumen ins Freie, Nov. 2017.

[16] DIN EN ISO 12354-1:2017 – Bauakustik- Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil1: Luftschalldämmung zwischen Räumen, ISO 12354-1, Jul. 2017.

[17] DIN EN ISO 12354-2:2017 – Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen, Nov. 2017.

[18] DIN EN ISO 12354-3:2017 – Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 3: Luftschalldämmung von Außenbauteilen gegen Außenlärm, Nov. 2017.

[19] DIN 4109-33:2016 – Schallschutz im Hochbau – Teil 33: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Holz-, Leicht- und Trockenbau, DIN 4109-33, Jul. 2016.

[20] DIN 4109-31:2016 – Schallschutz im Hochbau – Teil 31: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Rahmendokument, Jul. 2016.

[21] DIN 4109-32:2016 – Schallschutz im Hochbau – Teil 32: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Massivbau, Jul. 2016.

[22] DIN 4109-34:2016 – Schallschutz im Hochbau – Teil 34: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Vorsatzkonstruktionen vor massiven Bauteilen, Jul. 2016.

[23] DIN 4109-35:2016 – Schallschutz im Hochbau – Teil 35: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Elemente, Fenster, Türen, Vorhangfassaden, Jul. 2016.

[24] CSTB, «AcouBAT, Technical Manual AcouBAT V7.0»

[25] VDI 4100: Schallschutz im Hochbau – Wohnungen – Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz, Oct. 2012.

[26] DEGA Empfehlung 103: Schallschutz im Wohnungsbau, Schallschutzausweis, 2018.

[27] SIA D 0189, Bauteildokumentation Schallschutz im Hochbau: Zusammenstellung gemessener Bauteile. Zürich, 2005.

[28] Código Técnico de la Edificación, «Catálogo de elementos constructivos», 2011. https://www.codigotecnico.org/Programas/CatalogoElementosConstructivos.html, zuletzt geprüft am 25.03.2024.

[29] PTB Braunschweig, «Integration des Holz- und Skelettbaus in die neue DIN 4109: Abschlussbericht», Frauenhofer IRB Verlag, 2005.

[30] DIN 4109-35/A1: 2019 – Schallschutz im Hochbau – Teil 35: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Elemente, Fenster, Türen, Vorhangfassaden; Änderung A1, Berlin, 2019.

[31] C. Châteauvieux-Hellwig, «Schallschutzplanung und BIM im Holzbau – ein Zwischenstand» in 6. Internationale Fachtagung Bauphysik & Gebäudetechnik BGT 2022.

[32] C. Châteauvieux, «BIM-gestützter Planungsprozess zur Berechnung des Schallschutzes im Holzbau», Dissertation, Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation, Technische Universität München, München, 2023.

[33] C. Châteauvieux-Hellwig, J. Abualdenien, and A. Borrmann, «Analysis of early-design timber models for sound insulation» Advanced Engineering Informatics, 2022.

[34] Cástor Rodríguez Fernández, Firma Sound of Numbers, S.L., Videokonferenz am 04.03.2024

Anwendungsbereiche der KI-Potenziale in der Bauphysik und Gebäudetechnik

Clara-Larissa Lorenz
Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen E3D - RWTH Aachen
Aachen, Deutschland



Jérôme Frisch
Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen E3D - RWTH Aachen
Aachen, Deutschland



Christoph van Treeck
Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen E3D - RWTH Aachen
Aachen, Deutschland



Anwendungsbereiche der KI-Potenziale in der Bauphysik und Gebäudetechnik

1. Durchbrüche von Text zu Bild zu Bautechnologien

Der jüngste Aufschwung von KI-Anwendungen hat die Künstliche Intelligenz auch in der breiten Öffentlichkeit bekannt gemacht. Insbesondere der Erfolg von Large Language Models (wie ChatGPT und Perplexity) sowie von Text-zu-Bild-Modellen (wie DALL·E), die auf Basis von Texteingaben Bilder generieren, hat zu dieser Popularität beigetragen. Die innovativen Entwicklungen in der KI-Technologie gehen allerdings über die Bereiche Sprache und Bild hinaus. Auch im Bauwesen eröffnen sich vielfältige Möglichkeiten zur Unterstützung, Beschleunigung, Automatisierung und Revolutionierung herkömmlicher Prozesse von der Planungs- bis zur Betriebsphase. KI-Anwendungen bieten Potenziale zur Optimierung des Gebäudeentwurfs und zur Durchführung von Variantenvergleichen in der Planungsphase. Sie ermöglichen eine präzise Ausführung von Aufgaben mittels Robotik, den Abgleich zwischen dem geplanten Modell und dem tatsächlichen Baufortschritt durch Objekterkennung und bieten Perspektiven für intelligente Gebäude durch vorausschauende Regelung sowie eine Anpassung an die Bewohner in der Betriebsphase. Im Folgenden werden ausgewählte Anwendungsfälle aus den Bereichen Planung, Ausführung und Betrieb vorgestellt, die Einblicke in die Potenziale von KI bieten.

2. KI in der Planungsphase

KI, insbesondere durch ihre Unterkategorien Machine Learning (ML) und Deep Learning (DL), findet Anwendung in den frühen Phasen der Entwurfsplanung, etwa zur Unterstützung bei der Bedarfsplanung [1] sowie als Emulatoren für Gebäudesimulationen zur Vorhersage des physikalischen Verhaltens von Gebäuden. Insbesondere haben sich DL-Modelle als geeignet für die Prognose von Beleuchtungsverhältnissen [2], energetischem Verhalten [3] und thermischen Eigenschaften [4] erwiesen. Aufgrund des Potenzials zur Verbesserung der Gebäudeperformance werden im Folgenden die Entwurfsoptimierung und der Variantenvergleich als Anwendungsbeispiel näher beleuchtet.

2.1. Entwurfsoptimierung und Variantenvergleich

KI, insbesondere in der Form von Machine Learning (ML) und Deep Learning (DL) Modellen, kann aufwändige Simulationen und Berechnungen emulieren. Basierend auf Trainingsdaten aus Simulationen, ermöglichen diese Modelle die Nachbildung komplexer Prozesse, wie zum Beispiel Heiz- und Kühlenergieverbräuche, Tageslichtverfügbarkeit und thermischen Komfort. Obwohl zunächst Daten generiert werden müssen, um ein Modell zu trainieren, erweisen sich ML-/DL-basierte Methoden besonders bei der Designexploration und Optimierung großer Lösungsräume als vorteilhaft. Durch die Anwendung von Variantenvergleichen und Optimierung kann die Gebäudeperformance im Vergleich zu dem Basisentwurf erheblich verbessert werden [5–7].

Ein praktischer Ansatz kann folgendermaßen aussehen [8]: Ein*e Fachplaner*rin erstellt einen Basisentwurf sowie einen Lösungsraum von Entwurfsalternativen, indem er/sie relevante Variablen auswählt, dessen Auswirkungen auf die Gebäudeperformance untersucht werden sollen (dies kann in Programmen wie Grasshopper für Rhino oder Dynamo für Revit erfolgen). Über Nacht können die Simulationen sowie ML-/DL-Modellierungen durchgeführt werden. Hierfür werden automatisiert Stichproben aus dem Lösungsraum entnommen. Simulationen werden für diese Stichproben durchgeführt, wobei die Variablen zusammen mit den Simulationsergebnissen für die ML-/DL-Modellierung und Validierung verwendet werden. Hat das Modell eine ausreichende Genauigkeit erreicht, so müssen keine weiteren Simulationen durchgeführt werden. Das trainierte ML-/DL Modell kann verwendet werden, um Vorhersagen zur Gebäudeperformance aller Entwurfsvarianten innerhalb des definierten Lösungsraums schnell zu generieren.

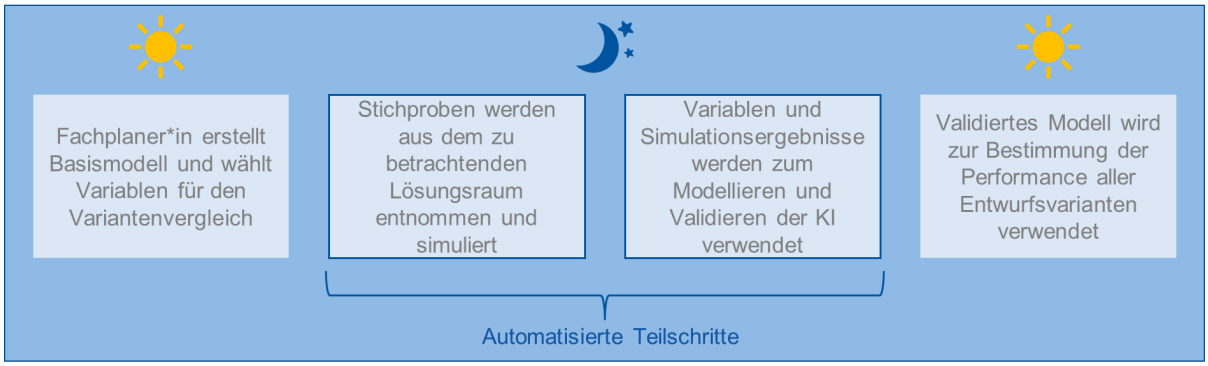


Abbildung 1: Verfahrenseinsatz von ML-/DL-Modellen zur Entwurfsoptimierung und zum Variantenvergleich. Abhängig von der Art der Simulation (beispielsweise sind Tageslichtsimulationen rechenintensiver als energetische Simulationen) und der Größe des betrachteten Lösungsraums gemäß der Anzahl der ausgewählten Variablen können die Simulationszeit, die Erstellung der Trainingsdaten und das Training des ML-/DL-Modells mehrere Stunden in Anspruch nehmen.

Die generierten Performanceergebnisse können über interaktive Plattformen, wie beispielsweise Design Explorer [9], gesichtet und ausgewertet werden. Diese interaktiven Tools ermöglichen das Filtern und Sortieren der generierten Entwürfe basierend auf definierten Entwurfskriterien und Prioritäten. Dadurch können Entwürfe mit verbesserter Performance gemäß festgelegter Zielkriterien, auch unter Berücksichtigung mehrerer Bewertungsmaßstäbe, identifiziert werden.

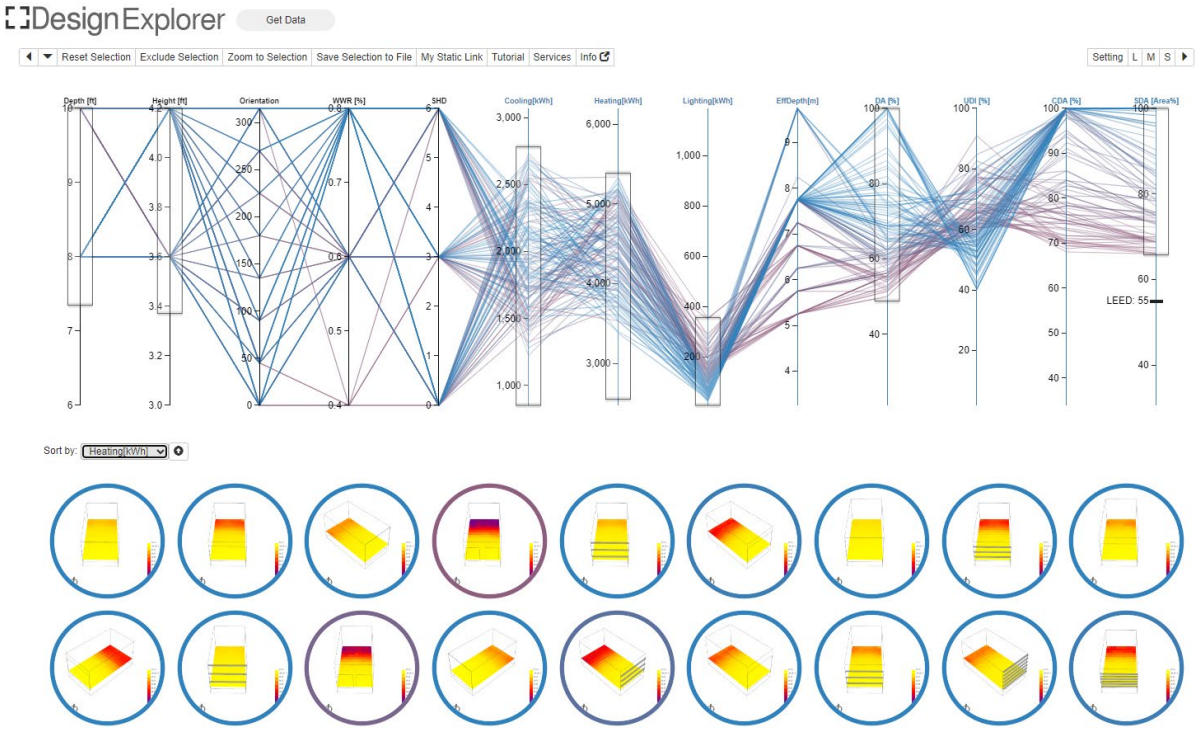


Abbildung 2: Ansicht der Benutzeroberfläche der interaktiven Plattform Design Explorer [10], die eine Durchsicht und Bewertung von Entwurfsvarianten ermöglicht. Nutzer können sowohl die Entwurfsvariablen (z.B. Höhe, Fensterflächenverhältnis), als auch Entwurfskriterien (Heiz-, Kühlenergieverbrauch und Tageslichtautonomie) filtern und eingrenzen. Die Entwurfsvarianten, die den festgelegten Kriterien entsprechen, werden im unteren Bereich der Ansicht dargestellt und können durch Anklicken im 3D-Viewer betrachtet werden.

3. KI-Anwendungen in der Bauüberwachung

Anwendungsbereiche der KI bei der Bauüberwachung und dem Baumanagement haben in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die Forschung widmet sich vielfältigen Themenbereichen, darunter die Unterstützung der Projektplanung, des Zeitmanagements, der Projektsteuerung [11], der KI-basierten Prognose von Projektkosten und der Projektdauer [12], der Risikoerkennung und Überwachung von Sicherheit [13, 14],

der Auswertung von 3D-Punktwolken, sowie der Bauüberwachung und Baufortschrittskontrolle [15, 16]. Ein grundlegender Baustein für einige der genannten Anwendungsfälle ist der Einsatz von DL-Methoden zur Objekterkennung und -klassifizierung. Dies umfasst beispielsweise die Identifizierung von Objekten auf der Baustelle für das Gesundheitsmonitoring sowie zum Abgleich mit dem geplanten Modell oder die Materialklassifizierung zur Überwachung des Baufortschritts. Daher wird im Folgenden der Soll-Ist-Vergleich auf der Baustelle mittels Deep-Learning-gestützter Objekterkennung als Anwendungsbeispiel näher betrachtet.

3.1. Soll-Ist Vergleich

Im Kontext der Bauüberwachung bietet die Anwendung von KI bei der Analyse von Foto- oder Videomaterial sowie Laserscans, in Verbindung mit dem Abgleich von BIM-Daten, Potenzial für den Soll-Ist-Vergleich während der Bauausführung sowie für den Gebäudebetrieb[16]. Der Datenzuwachs auf Baustellen durch Smartphones, Kameras und Sensoren bis hin zur Robotik, eröffnet Möglichkeiten, die Daten auf ein Cloud-System hochzuladen, diese mit DL-basierten Computer-Vision Techniken auszuwerten und mit vorhanden BIM-Modellen abzugleichen [17].

Emunds et al. [18] erstellten einen speziell angelegten Datensatz, benannt als IFCNet, der aus einzelnen IFC-Entitäten besteht, welche eine breite Palette von IFC-Klassen, einschließlich Gebäudetechnikkomponenten, abdecken. IFCNet und die darauf trainierten DL-Modelle bieten eine methodische Grundlage, um (TGA-)Objekte in BIM-Modellen basierend auf ihrer Geometrie zu klassifizieren. Das Ziel des Datensatzes besteht weiterhin darin, durch die Klassifizierung anhand der DL-Modelle die semantische Anreicherung von BIM-Modellen zu unterstützen und die Datenqualität und Präzision von BIM-Modellen für die Planungs-, Ausführungs- und Betriebsphase zu verbessern.

In einem weiteren Beitrag entwickelten Emunds et al. [19] das SpaRSE-BIM DL-Modell für die Klassifizierung von Punktwolken. Im Vergleich zu vorherigen Methoden ermöglichten spärliche Faltungen (Sparse Convolutions) ein ressourcenschonenderes Training und Inferenz, während sie gleichzeitig eine Genauigkeit entsprechend dem Stand der Technik erreichten. Die Objekterkennung bzw. -klassifizierung in Modellen und 3D-Scans von Baustellen durch Punktwolken eröffnet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, etwa den Abgleich der Daten mit geplanten Modellen zur Bewertung des Baufortschritts oder zur Erstellung eines As-Built-Modells für den Gebäudebetrieb. Dies ermöglicht eine Verbesserung der Bauausführung und gewährleistet die Übereinstimmung zwischen Planung und tatsächlichem Bauzustand. Obwohl die As-Built-Modellierung primär den Gebäudebetrieb betrifft, ist die Erwähnung hier relevant, da die Durchführung von Scans, insbesondere im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung (TGA), während der Bauausführung entscheidend ist, da viele Elemente nach Abschluss der Bauarbeiten nicht mehr sichtbar oder zugänglich sind.

4. KI-Anwendungen im Gebäudebetrieb

Im Gebäudebetrieb werden zunehmend Daten erhoben. Fortschritte in der Sensortechnologie und die Installation von Smart-Metern ermöglichen ein Monitoring verschiedener Aspekte des Gebäudebetriebs. KI bietet eine Möglichkeit zur Nutzung dieser Daten durch automatisierte Analyse und Auswertung [20]. Die Daten können ebenfalls als Grundlage dienen, um Prognosen, beispielsweise zum Energieverbrauch des Gebäudes [21] oder zum Nutzerverhalten [22], aufzustellen. Zusätzlich ermöglicht KI die Implementierung einer vorausschauenden Regelung für Heizung, Kühlung und Lüftung im Gebäudebetrieb [23]. Eine initiale Herausforderung stellt der Umgang mit unvollständigen oder fehlerhaften Daten dar. In diesem Kontext werden KI-basierte Anwendungen vorgestellt, die Lösungsansätze zur Rekonstruktion fehlender Daten bieten. Anschließend wird der Anwendungsfall für die vorausschauende Regelung der Gebäudetechnik aufgezeigt.

4.1. Imputation fehlender Daten

Monitoringdaten dienen als Basis zur Erfassung von aktuellen Zuständen im Gebäudebetrieb. Allerdings ist bekannt, dass Gebäudemonitoringdaten mit Ungenauigkeiten und Abweichungen behaftet sein können, Messsignale fehlerhaft sein und Ausfälle vorkommen können, sowie anderweitige Ausreißer vorhanden sein können. Die Frage, wie mit solchen Unzulänglichkeiten umzugehen ist, stellt sich daher regelmäßig. Zu den verbreiteten Methoden der Vorverarbeitung zählen statistische Verfahren wie lineare Interpolation, Imputation des Mittelwerts oder Medians, die Übernahme der letzten Beobachtung (Last Observation Carried Forward, LOCF) oder die Übernahme der nächsten Beobachtung (Next Observation Carried Backward, NOCB), sowie KNN-Imputation [24]. KNN ist eine ML-Methode, welche im Datensatz die den fehlenden Daten ähnlichsten Beobachtungen identifiziert und den fehlenden Wert durch den Durchschnitt (oder einen anderen statistischen Wert) dieser ähnlichen Nachbarn ersetzt.

Eine weitere fortgeschrittene Methode wird durch DL-Verfahren mittels Autoencoder-Neuronalen-Netzen zur Rekonstruktion von Zeitreihendaten geboten. So demonstrierten Liguori et al. [25], dass sich solche Modelle zur Rekonstruktion fehlender Daten bezüglich der Innenraumluftqualität (IEQ) eignen. Die Ergebnisse zeigten, dass fehlende Werte für Raumtemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und CO_2-Konzentration mit hoher Genauigkeit rekonstruiert werden konnten. Ergänzend demonstrierten Liguori et al. [26], dass Autoencoder mit einem geeigneten Domain-Adaptionsverfahren, bei der ein Autoencoder-Modell so kalibriert wird, dass es Daten aus einem neuen Anwendungsbereich (Domain) verarbeiten kann, fehlende tägliche Raumtemperaturdaten mit einer Genauigkeit von 0,6°C gemäß der Root Mean Square Error (RMSE)-Metrik rekonstruieren konnten.

Weiterführende Untersuchungen zur Generalisierungsfähigkeit bei der Rekonstruktion fehlender Datenströme des elektrischen Energieverbrauchs ergaben, dass die Ergänzung fehlender täglicher Werte in erheblich unterschiedlichen Gebäuden möglich ist [27]. Jedoch ist Domain-Adaptation für eine zufriedenstellende Modellleistung erforderlich, insbesondere beim Übertragen des Modells von gemischten zu natürlich belüfteten Gebäuden. Zudem zeigte sich, dass die Modellgenauigkeit durch Datenaugmentation erheblich gesteigert werden konnte. Dieses Verfahren umfasst die künstliche Erweiterung des Datensatzes durch die Erzeugung multipler Kopien desselben Datensatzes und das Hinzufügen von pseudozufälligem Rauschen, um die Datenvariabilität künstlich zu erhöhen und so die Robustheit des Modells gegenüber verschiedenen Fehldatenszenarien zu verbessern.

Zusammenfassend bieten die genannten Studien wertvolle Einblicke in die Anwendung von Autoencodern, ergänzt durch Domain-Adaption und künstliche Datenaugmentation mit verrauschten Daten, zum effektiven Rekonstruieren von Datenlücken innerhalb eines Tages. Kontinuierliche Lücken, die länger als ein Tag andauern, oder Daten des folgenden Tages lassen sich damit nicht rekonstruieren. Für solche Fälle bietet sich jedoch die Möglichkeit, zusätzliche vorhandene Zeitreihen einzubeziehen, um die Lücken zu schließen. Dies bedeutet den Übergang von univariaten zu multivariaten Zeitreihenanalysen. Beispielsweise könnten Daten zur Außentemperatur, zur Anwesenheit von Personen oder zu Fensteröffnungen herangezogen werden, um fehlende Werte der Raumtemperatur sinnvoll zu ergänzen.

4.2. Vorausschauende Gebäuderegelung

Gebäudesimulationen, Energieprognosen und Vorhersagen von Raumklimaparametern wie Raumtemperatur oder CO_2-Konzentrationen ermöglichen eine vorausschauende Regelung von Heizungs-, Kühlungs- und Lüftungssystemen, im Gegensatz zu reaktiven Ansätzen [28]. Mitunter lassen sich durch eine vorausschauende Regelung Energieeinsparungen realisieren oder der Nutzerkomfort steigern [23, 29, 30]. Eine Regelungsmethode, die das ermöglicht, ist die modellprädiktive Regelung (MPC), bei der auf Basis von Vorhersagen über einen erweiterten Zeithorizont optimale Einstellungen, beispielsweise die Soll-Raumtemperatur für die kommenden Stunden, festgelegt werden, um Zielkriterien, beispielsweise Energieeinsparungen, zu maximieren.

Simulationsmodelle bieten eine Methode zur Vorhersage von Gebäudeleistungen, doch sie unterliegen gewissen Einschränkungen. Die Festlegung dynamischer Zeitpläne kann sich als komplex gestalten. Ebenso erweist sich die Integration historischer Wetterdaten sowie aktueller Wettervorhersagen als herausfordernd, da diese in einem spezifischen Format der Simulationssoftware vorgelegt werden müssen und der verlustbehafteten Interpolation zwischen weit entfernten Wetterstationen unterliegen können. Ein weiteres Problem betrifft die erforderliche Rechenzeit für die Simulationen. Angesichts der zunehmenden Menge und Diversität verfügbarer Daten bieten sich DL-Modelle an, Vorher-sagen von Gebäudeleistungen und Verläufen innenraumklimatischer Parameter auf Grundlage dieser Daten zu treffen. Zudem sind DL-Modelle, sobald sie einmal trainiert sind, in der Lage, Prognosen in Sekundenschnelle zu erstellen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes DataFEE wurde ein solcher Ansatz verfolgt [31]. DL-Modelle wurden genutzt, um aus Daten des Gebäudemonitorings, historischen Wetterdaten und Wetterprognosen zu lernen. Ziel war es, Vorhersagen bezüglich Raumtemperaturprofilen, CO_2-Verläufen sowie Heiz- und Kühlenergieverbräuchen zu generieren. Diese Modelle kamen in einer Feldstudie zur Optimierung der Regelung von Fassadenlüftungsgeräten in einem Bürogebäude zum Einsatz. Innerhalb der Feldstudie konnten lediglich die Leistung des Zuluftventilators und die Raumsolltemperatur der Fassadenlüftungsgeräte angepasst werden. Ziel der Optimierung war es, die Einstellungen der Raumsolltemperatur und der Ventilatorleistung so anzupassen, dass der Energieverbrauch minimiert wurde, während gleichzeitig der Nutzerkomfort gewährleistet blieb.

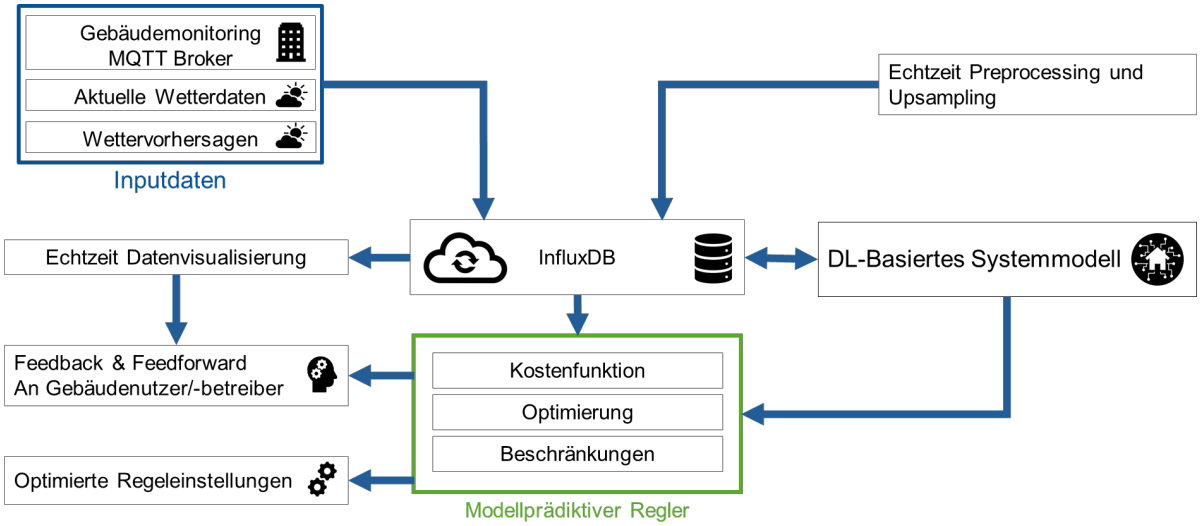


Abbildung 3 Datenfluss zur Cloud-basierten Anbindung eines DL-basierten Modell-prädiktiven Reglers [31]

Die Ergebnisse der Feldstudie offenbarten Herausforderungen bei der Implementierung DL-basierter modellprädiktiver Regelungen (MPC). Erstens ergab sich die Problematik, dass es sich bei den DL-Modellen um Blackbox-Modelle handelte, sodass nicht klar erkennbar war, welche Zusammenhänge die Modelle gelernt hatten. Beispielsweise stellte sich in durchgeführten Plausibilitätschecks heraus, dass die Modelle, bei einer Kostenfunktion zum Erhöhen der Raumtemperatur, Kühlen als optimierte Regeleinstellung herausgaben. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass im Sommer, der Zeit mit den höchsten Raumtemperaturen (RT), gekühlt wurde, sodass die Modelle fälschlicherweise Kühlen vorschlugen, um hohe Raumtemperaturen zu erreichen. Aufgrund dieser Erkenntnis wurden nachfolgend die DL-Modelle in der Studie für Heiz- und Kühlperioden separat modelliert. Zweitens zeigte sich, dass hohe Genauigkeiten der DL-Modelle nicht zwangsläufig die Eignung für den Einsatz in einem MPC garantieren. Trotz hoher Genauigkeit gemäß standardisierten Leistungsmetriken führte die Optimierung teilweise zu nicht sinnvollen Regelungseinstellungen. Ein Faktor hierfür war die Größe des Lösungsraums; die Optimierung über mehrere Zeitintervalle innerhalb des Regelungshorizonts erzeugte einen enormen Lösungsraum von mehreren Billiarden Kombinationsmöglichkeiten, sodass die DL-Modelle diesen nicht mehr effektiv abdecken konnten. Als Konsequenz hieraus ergibt sich, dass allein auf Monitoringdaten basierendes Training von DL-Modellen für die modellprädiktive Regelung (MPC) womöglich nicht ausreichend sein kann. Der Grund hierfür liegt darin, dass in realen

Gebäudeumgebungen oft langfristig konstante Regeleinstellungen vorherrschen, welche den Lösungsraum nicht adäquat abbilden und somit eine unzureichende Datengrundlage für das Training der Modelle bieten. Deshalb könnte der Einsatz synthetischer Datenaugmentation erforderlich sein, um den Lösungsraum umfassend zu erfassen und die Modelle effektiver auf die Vielfalt realer Szenarien vorzubereiten.

Die Herausforderungen bei der Implementierung DL-basierter modellprädiktiver Regelungen (MPC) weisen auf wichtige Aspekte für zukünftige Forschungen und Entwicklungen hin. Trotz gewisser Einschränkungen, wie der Blackbox-Natur der Modelle und der Komplexität des Lösungsraums, unterstreichen Studien das erhebliche Potenzial von DL-basierten MPCs für die Betriebsoptimierung sowie die Steigerung der Energieeffizienz in Gebäuden.

5. Ausblick

In diesem Beitrag wurden Einblicke in KI-Anwendungsbereiche anhand spezifischer Anwendungsfälle in den Phasen der Planung, Bauüberwachung sowie des Gebäudebetriebs gegeben. Die vorgestellten Anwendungen umfassen die Emulation bauphysikalischer Verhaltensweisen von Gebäuden zur Entwurfsoptimierung, den Soll-Ist-Vergleich mittels Objekterkennung in der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) durch Deep-Learning-Methoden, die Rekonstruktion von Zeitreihendaten in der Gebäudeautomation und die Integration von DL-Modellen in vorausschauende Regelungssysteme wie modellprädiktive Regelungen zur Energieverbrauchsminimierung unter Berücksichtigung des thermischen Komforts. Diese Anwendungsbereiche erstrecken sich auch auf Felder außerhalb der Gebäudephysik und TGA. Die Durchdringung der Bauindustrie mit KI-Anwendungen ist umfassend, und es ist kaum ein Bereich vorstellbar, in dem nicht bereits Forschung oder Implementierung stattfindet.

Die Herausforderungen in der Anwendung von KI in der Bauindustrie umfassen nicht nur Anforderungen an Datenmenge und -qualität, sondern auch an die Blackbox-Natur der DL-Modelle. Diese Undurchsichtigkeit der Modelle erschwert das Verständnis darüber, wie die Modelle zu ihren Entscheidungen kommen, was insbesondere in kritischen Anwendungen zu Herausforderungen führen kann. In der Baubranche sind universell einsetzbare Modelle, die eine Vielzahl von Szenarien abdecken können, ähnlich wie ChatGPT in der Sprachverarbeitung, noch selten. Ein universelles Modell in diesem Kontext wäre beispielsweise eines, das Simulationen einer Domäne vollständig ersetzen könnte, anstatt nur für spezifische Eingabevariablen und Fallstudien zu funktionieren. Für die Entwicklung solcher umfassend generalisierbaren Modelle sind deutlich größere Datenmengen erforderlich, und die Datenqualität muss gewährleistet sein. Dabei besteht stets das Risiko, dass sich mit der Ausweitung des Anwendungsbereichs die Modellgenauigkeit durch die Generalisierung verschlechtert. Dennoch ist es denkbar, dass, sollten Ressourcen wie jene von bspw. OpenAI auf spezifische Anwendungsfälle in der Bauindustrie angewendet werden, in Zukunft leistungsfähigere KI-Anwendungen sowohl den Sektor der Bauphysik als auch der Gebäudetechnik, von der Planungs- bis zur Betriebsphase, maßgeblich prägen werden.

6. Literaturverzeichnis

[1] Moroff, Nikolas Ulrich und Sardesai, Saskia: *Machine learning in demand planning: Cross-industry overview*, Published in: Artificial Intelligence and Digital Transformation in Supply Chain Management. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL). Berlin [online], 2019, Vol. 27, p. 355–383, Online im Internet: DOI 10.15480/882.2476, https://doi.org/10.15480/882.2476https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

[2] Ayoub, Mohammed: *A review on machine learning algorithms to predict daylighting inside buildings*, Solar Energy, 15.5.2020, Vol. 202, p. 249–275, DOI 10.1016/j.solener.2020.03.104,

[3] Olu-Ajayi, Razak; Alaka, Hafiz; Owolabi, Hakeem; Akanbi, Lukman und Ganiyu, Sikiru: *Data-Driven Tools for Building Energy Consumption Prediction: A Review*, 1.3.2023, MDPI.

[4] Qavidel Fard, Zahra; Zomorodian, Zahra Sadat und Korsavi, Sepideh Sadat: *Application of machine learning in thermal comfort studies: A review of methods, performance and challenges*, 1.2.2022, Elsevier Ltd.

[5] Attia, Shady; Hamdy, Mohamed; O'Brien, William und Carlucci, Salvatore: *Assessing Gaps and Needs for Integrating Building Performance Optimization Tools in Net Zero Energy Buildings Design*, Energy and Buildings, 2013, Vol. 60, p. 110–124, DOI 10.1016/j.enbuild.2013.01.016,

[6] Bre, Facundo; Silva, Arthur Santos; Ghisi, Enedir und Fachinotti, Víctor D: *Residential Building Design Optimisation Using Sensitivity Analysis and Genetic Algorithm*, Energy and Buildings, 2016, Vol. 133, p. 853–866, DOI 10.1016/j.enbuild.2016.10.025,

[7] Shahbazi, Yaser; Heydari, Mahdieh und Haghparast, Farzin: *An Early-Stage Design Optimization for Office Buildings' Façade Providing High-Energy Performance and Daylight*, Indoor and Built Environment, 2019, Vol. 28, no. 10, p. 1350–1367, DOI 10.1177/1420326X19840761,

[8] Lorenz, C. L.; Spaeth, A. B.; Bleil de Souza, C. und Packianather, M. S.: *Artificial Neural Networks for parametric daylight design*, Architectural Science Review, 2020, Vol. 63, no. 2, p. 210–221, DOI 10.1080/00038628.2019.1700901,

[9] Howes, Benjamin: *Design Explorer Announcement*, 2017,

[10] Tomasetti, Thornton und Peng, M: *DesignExplorer*, 2019 [online], Online im Internet: https://tt-acm.github.io/DesignExplorer/ (7.4.2024).

[11] Merdzanovic, Iman; Vukomanovic, Mladen und Ivandic Vidovic, Darija: *A Comprehensive Literature Review of Research Trends of Appyling AI to Construction Project Management*, In: 6TH IPMA SENET Project Management Conference: Digital Transformation and Sustainable Development in Project Management [online]. 2022, p. 230–247, Online im Internet: https://www.researchgate.net/publication/372883741

[12] Ujong, Jesam Abam; Mbadike, Elvis Michael und Alaneme, George Uwadiegwu: *Prediction of cost and duration of building construction using artificial neural network*, Asian Journal of Civil Engineering, 1.11.2022, Vol. 23, no. 7, p. 1117–1139, DOI 10.1007/s42107-022-00474-4,

[13] Xu, Yayin; Zhou, Ying; Sekula, Przemyslaw und Ding, Lieyun: *Machine learning in construction: From shallow to deep learning*, Developments in the Built Environment, 1.5.2021, Vol. 6, DOI 10.1016/j.dibe.2021.100045,

[14] Akinosho, Taofeek D.; Oyedele, Lukumon O.; Bilal, Muhammad; Ajayi, Anuoluwapo O.; Delgado, Manuel Davila; Akinade, Olugbenga O. und Ahmed, Ashraf A.: *Deep learning in the construction industry: A review of present status and future innovations*, Journal of Building Engineering, 1.11.2020, Vol. 32, DOI 10.1016/j.jobe.2020.101827,

[15] Khallaf, Rana und Khallaf, Mohamed: *Classification and analysis of deep learning applications in construction: A systematic literature review*, Automation in Construction, 1.9.2021, Vol. 129, DOI 10.1016/j.autcon.2021.103760,

[16] Pal, Aritra und Hsieh, Shang Hsien: *Deep-learning-based visual data analytics for smart construction management*, 1.11.2021, Elsevier B.V.

[17] Lin, Jacob J. und Golparvar-Fard, Mani: *Construction Progress Monitoring Using Cyber-Physical Systems*, In: Anumba, Chimay J. und Roofigari-Esfahan, Nazila (Hrsg.), Cyber-Physical Systems in the Built Environment, 1. Springer Cham, 2020, p. 63–87,

[18] Emunds, Christoph; Pauen, Nicolas; Richter, Veronika; Frisch, Jérôme und Van Treeck, Christoph. IFCNet: A Benchmark Dataset for IFC Entity Classification [online]. 2021. Online im Internet: https://ifcnet.e3d.rwth-aachen.de

[19] Emunds, Christoph; Pauen, Nicolas; Richter, Veronika; Frisch, Jérôme und Van Treeck, Christoph: *SpaRSE-BIM: Classification of IFC-based geometry via sparse convolutional neural networks*, Advanced Engineering Informatics, 1.8.2022, Vol. 53, DOI 10.1016/j.aei.2022.101641,

[20] Himeur, Yassine; Elnour, Mariam; Fadli, Fodil; Meskin, Nader; Petri, Ioan; Rezgui, Yacine; Bensaali, Faycal und Amira, Abbes: *AI-big data analytics for building automation and management systems: a survey, actual challenges and future perspectives*, Artificial Intelligence Review, 1.6.2023, Vol. 56, no. 6, p. 4929–5021, DOI 10.1007/s10462-022-10286-2,

[21] Amasyali, Kadir und El-Gohary, Nora M.: *A review of data-driven building energy consumption prediction studies*, 2018, Elsevier Ltd.

[22] Djenouri, Djamel; Laidi, Roufaida; Djenouri, Youcef und Balasingham, Ilangko: *Machine learning for smart building applications: Review and taxonomy*, ACM Computing Surveys, 1.5.2019, Vol. 52, no. 2, DOI 10.1145/3311950,

[23] Yao, Ye und Shekhar, Divyanshu Kumar: *State of the art review on model predictive control (MPC) in Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) field*, Building and Environment [online], 1.8.2021, Vol. 200, p. 107952, Online im Internet: DOI 10.1016/j.buildenv.2021.107952, https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132321003565 (26.10.2022).

[24] Cho, Brian; Dayrit, Teresa; Gao, Yuan; Wang, Zhe; Hong, Tianzhen; Sim, Alex und Wu, Kesheng: *Effective Missing Value Imputation Methods for Building Monitoring Data*, In: Proceedings - 2020 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 10.12.2020, ISBN 9781728162515, p. 2866–2875,

[25] Liguori, A.; Markovic, R.; Dam, T. T. H.; Frisch, J.; Van Treeck, C. und Causone, F.: *Indoor environment data time-series reconstruction using autoencoder neural networks*, Building and Environment, 2021, Vol. 191,

[26] Liguori, Antonio; Markovic, Romana; Frisch, Jérôme; Wagner, Andreas; Causone, Francesco und Van Treeck, Christoph: *A gap-filling method for room temperature data based on autoencoder neural networks*, In: Building Simulation Conference Proceedings. International Building Performance Simulation Association, 2022, ISBN 9781775052029, p. 2427–2434,

[27] Liguori, Antonio; Markovic, Romana; Ferrando, Martina; Frisch, Jérôme; Causone, Francesco und Van Treeck, Christoph: *Augmenting energy time-series for data-efficient imputation of missing values*, Applied Energy, 15.3.2023, Vol. 334, DOI 10.1016/j.apenergy.2023.120701,

[28] Serale, Gianluca; Fiorentini, Massimo; Capozzoli, Alfonso; Bernardini, Daniele und Bemporad, Alberto: *Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities*, Energies 2018, Vol. 11, Page 631 [online], 12.3.2018, Vol. 11, no. 3, p. 631, Online im Internet: DOI 10.3390/EN11030631, https://www.mdpi.com/1996-1073/11/3/631/htm (17.5.2023).

[29] Mirakhorli, Amin und Dong, Bing: *Occupancy behavior based model predictive control for building indoor climate—A critical review*, Energy and Buildings, 1.10.2016, Vol. 129, p. 499–513, DOI 10.1016/J.ENBUILD.2016.07.036,

[30] Afram, Abdul; Janabi-Sharifi, Farrokh; Fung, Alan S. und Raahemifar, Kaamran: *Artificial neural network (ANN) based model predictive control (MPC) and optimization of HVAC systems: A state of the art review and case study of a residential HVAC system*, Energy and Buildings [online], 2017, Vol. 141, p. 96–113, Online im Internet: DOI 10.1016/j.enbuild.2017.02.012, http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.012

[31] Wagner, Andreas; Mino Rodriguez, Isabel; Lorenz, Clara-Larissa; Abele, Oliver; Aldrett Ranal, Emiliano; Orth, André; Frisch, Jérôme; Nienaber, Felix; Koczorek, Nicole; Müller, Dirk; Rewitz, Kai; Park, Sumee; Heiler, Sarah; Grün, Gunnar; Berning, Matthias; Schalk, Roswitha und Van Treeck, Christoph. Gemeinsamer Abschlussbericht zum Fördervorhaben EnOB: DataFEE-Data mining, machine learning, feedback, and feedforward-Energieeffizienz durch nutzungszentrierte Gebäudesysteme. Förderkennzeichen: 03EN1002A-E. In press bei der TIB Hannover, 2024.

GEBÄUDE – technik | bauteile | materialien

Schwingungen von Holzdecken – neues aus Normung und Forschung

Eurocode 5 – neue Regeln zur Gebrauchstauglichkeit

Roland Maderebner
Arbeitsbereich Holzbau
Universität Innsbruck
Innsbruck, Österreich



Thomas Hillberger
Arbeitsbereich Holzbau
Universität Innsbruck
Innsbruck, Österreich



Eurocode 5 – neue Regeln zur Gebrauchstauglichkeit

1. Einleitung

Eines der bekanntesten Zitate in der Schriftenreihe «De architectura libri decem» Vitruvs beschreibt die wichtigsten Attribute eines Bauwerkes mit «Firmitatis – Utilitatis – Venustatis» (Standfestigkeit – Gebrauchstauglichkeit – Schönheit). Die Reihenfolge liest sich dabei – je nach Berufsgruppe – unterschiedlich. Lässt sich die Schönheit eines Bauwerks nur schwer objektiv bewerten (Anm.: Ansätze wie z.B. den «Goldenen Schnitt» gab es auch hier), können hingegen Anforderungen an die Standfestigkeit (Tragfähigkeit) und die Gebrauchstauglichkeit klar definiert werden, da diese physikalischen Prinzipien folgen. Überlagert werden diese Prinzipien durch wirtschaftliche Kriterien. In den technischen Regelwerken zur Dimensionierung von Bauteilen wird dieser Spagat durch die Verwendung von sogenannten Teilsicherheitsbeiwerten mit semi-probabilistischen Sicherheitskonzepten umgesetzt. In der Familie der Eurocodes werden diese Sicherheitskonzepte angewandt und über sogenannte Grenzzustände die konstruktive Zuverlässigkeit der Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von Tragwerken definiert.
Eine erste Einführung der für den Holzbau gültigen Ausgabe der EN 1995-1-1 [2] wurde in den Jahren 2003/04 als Normenentwurf umgesetzt und nach einer Übergangsphase zu den Normen wie z.B. der DIN 1052-1 und der ÖNORM B 4100 endgültig eingeführt. Somit gilt der Eurocode 5 als eine noch relativ junge Norm die regelmäßig überarbeitet werden muss, um im kompetitiven Umfeld der Bauprodukte mithalten zu können.

Wie bereits in vielen Vorträgen angekündigt, unter anderem auch beim 27. Internationalen Holzbau-Forum in Innsbruck [1], wurden die Teile des Eurocode 5 (prEN 1995-1-1:2023, prEN 1995-1-2:2023, prEN 1995-2:2023, prEN 1995-3:2023, ONR CEN/TS 19103:2023) umfangreich überarbeitet und zu Beginn 2023 erste Entwürfe für die Abgabe von Stellungnahmen zur Verfügung gestellt. Auch die deutsche Übersetzung des Entwurfs der prEN 1995-1-1 steht nun mit der Ausgabe 2023-10-01 seit Herbst 2023 zur Verfügung.

Der Ingenieurholzbau hat sich in den vergangenen Jahren sehr stark weiterentwickelt. Innovative Holzwerkstoffe, neue Technologien zur Lösung von Knotenpunkten aber auch die gestiegene Leistungsfähigkeit der Softwareprogramme (Stichwort FEM, CAD/CAM) geben Projektentwicklern mehr Freiraum in der Gestaltung. Durch diese gestiegenen Leistungsfähigkeiten werden häufig auch immer größere Spannweiten sowie höhere und schlankere Bauwerke realisiert. Neben klassischen, einachsig gespannten Deckensystemen kommen bereits umfanggelagerte oder auch punktgestützte Deckensysteme zur vermehrten Anwendung. Neben den damit einhergehenden Herausforderungen an die Einhaltung der Tragfähigkeit sind es bei der Methode der Bemessung von Bauteilen nach Grenzzuständen, vielfach die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit, die maßgebend für die Dimensionierung werden.

Die Tragwerksplanung und dafür erforderlichen konstruktiven Nachweise im Holzbau sind im Vergleich zu anderen Materialien in vielen Bereichen komplexer und auch zeitaufwendiger. Die umfangreichen Überarbeitungen und Umstellungen des aktuellen Normenentwurfs prEN 1995-1-1 [3] müssen auch in die Softwarepakete eingearbeitet werden (*Anm.: Auch die Ausgaben der EN 1990 und EN 1991 wurden überarbeitet*). Bis dies zur Gänze, inklusive nationaler Erläuterungen und Ergänzungen, zufriedenstellend umgesetzt wird, muss man in einer bestimmten Übergangsphase vermehrt auf die manuelle Nachweisführung zurückgreifen. Auch den klassischen Plausibilitätskontrollen ist, wie bei der vorliegenden grundlegenden Änderung einer Bemessungsvorschrift, verstärktes Augenmerk zu schenken. Zusätzlich entstehen auch in der Lehre neue Aufgaben aber auch neue Schwerpunkte müssen definiert und gezielt gesetzt werden.

In diesem Aufsatz wird auszugsweise auf die Neuerungen der prEN 1995-1-1 bei den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit eingegangen.

Bei diesem Normenentwurf wurde insbesondere die stark gestiegene Seitenanzahl im Vergleich zur bisherigen Fassung des Eurocodes 5 von Seiten 142 auf Seiten 469 zum Teil sehr emotional diskutiert. Diese Entwicklung ist neben der Einarbeitung von Produkteigenschaften in den Anhängen (insgesamt gibt es nun die Anhänge A bis S (19)) wie CLT oder LVL, vor allem auch der Tatsache geschuldet, dass sich der Holzbau seit der Einführung 2004 in den letzten zwei Jahrzehnten sehr stark weiterentwickelt hat. Neben vielen Neuerungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit, wurden auch die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit angepasst.

Auf Grund der geringen Elastizitätskonstanten rechtwinklig zur Faserrichtung wurden im Kapitel der Gebrauchstauglichkeit auch Gleichungen zur Berücksichtigung der Verformungen bei Krafteinleitungen rechtwinklig zur Faserrichtung neu aufgenommen.

Im folgenden Beitrag werden vor allem Vergleiche zwischen der aktuellen Fassung des Eurocodes [2] auf europäischer Ebene und dem Normenentwurf [3] angestellt. Zudem werden einige Ergänzungen hinsichtlich der Nationalen Anwendungsdokumente Österreichs [4] bzw. Deutschlands [5] angeführt.

Die verwendeten Fachbegriffe (Boden, Ablenkung, sichtbare Steifigkeit, …) in der deutschen Übersetzung zur Ausgabe prEN 1995-1-1:2023-10-01 werden in diesem Aufsatz unkommentiert übernommen.

2. Allgemeine Änderungen im Kapitel der Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Nicht nur die Seitenanzahlt (von 5 auf 16) für die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit hat sich im Vergleich zum aktuell gültigen Dokument des Eurocodes 5 erhöht. Neben der Kapitelnummer (aktuell Kapitel 7 und neu Kapitel 9), liegt diesem Abschnitt ebenfalls eine neue Struktur zugrunde. Der Vergleich der aufgelisteten Unterkapitel in Tabelle 1 soll diesbezüglich einen Überblick verschaffen.

Tabelle 1: Vergleich des strukturellen Aufbaus zwischen EN 1995-1-1:2004 [2] und prEN 1995-1-1:2023 [3]

EN 1995-1-1:2004 [2]		**prEN 1995-1-1:2023 [3]**	
7.	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	9.	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit
		9.1	Allgemeines
7.1	Nachgiebigkeit der Verbindungen		
7.2	Grenzwerte für die Durchbiegungen von Biegestäben	9.2	Verformungen
		9.2.1	Allgemeines
		9.2.2	Verformungen in Bauwerken aus Materialien mit gleichem Kriechverhalten
		9.2.3	Verformungen in Bauwerken aus Materialien mit ungleichem Kriechverhalten
7.3	Schwingungen	9.3	Schwingungen
7.3.1	Allgemeines	9.3.1	Allgemeines
7.3.2	Durch Maschinen verursachte Schwingungen	9.3.2	Schwingungen durch Maschinen
7.3.3	Wohnungsdecken	9.3.3	Schwingungen durch Schritte
		9.3.4	Eigenfrequenz
		9.3.5	Steifigkeit
		9.3.6	Beschleunigung
		9.3.7	Geschwindigkeit
		9.3.8	Schwingungskriterien
		9.3.9	Alternative Verifizierung
		9.4	Druckverformung senkrecht zur Faser
		13.3.3	Verformungen in der Ebene von Rahmenwänden
		13.4.5	Verformungen in der Ebene von Rahmenböden
		Anhang G	Alternatives Verfahren für die Schwingungsanalyse von Böden

Zusätzlich zu [2] gibt es z.B. aktuell im Nationalen Anwendungsdokument von Österreich [4] folgende Ergänzungen bzw. zusätzliche Kapitel:

- Ergänzung zu 7.1 und 7.2
- 7.2.1 Allgemeines –
- 7.2.2 Elastische Anfangsdurchbiegung
- 7.2.3 Gesamte Enddurchbiegung
- 7.2.4 Nationale Ergänzung zu ÖNORM EN 1995-1-1:2019, Abschnitt 7.2
- 7.3.3.1 Allgemeines
- 7.3.3.2 Frequenzkriterium
- 7.3.3.3 Steifigkeitskriterium
- 7.3.3.4 Nachweisführung
- 7.3.3.5 Alternative Nachweisführung

Das Nationale Anwendungsdokument von Deutschland [5] verweist, neben geringfügigen Ergänzungen zu 7.1 und 7.2, bei 7.3 und Wohnungsdecken auf die Grenzwerte unterschiedlicher Deckensysteme von [6].

Viele Bereiche die derzeit auch auf nationaler Ebene geregelt sind, werden im neuen Eurocode 5 durch die erweiterte Nachweisführung im Grundlagendokument definiert. Im Kapitel 9 werden Regeln zur Einhaltung der Verformungen definiert, um Anforderungen an das Erscheinungsbild sowie den Benutzerkomfort zu erfüllen, aber auch um Schäden an Oberflächen und untergeordneten Bauteilen vermeiden zu können. Hier kommt es neben den Bezeichnungen der Variablen nur zu geringen Änderungen. Die Begrenzung der Schwingungen hält sich an das Personenempfinden sowie an die uneingeschränkte funktionale Wirksamkeit des Bauwerks.

3. Verformungen nach prEN 1995-1-1:2023

3.1. Allgemeines

Mit der neuen Ausgabe wird nun deutlich klarer herausgearbeitet, dass bei den vertikalen Durchbiegungen die variable Einwirkung Q in einen kurzzeitigen Q_{inst} und einen quasi-ständigen Anteil Q_{qper} aufgeteilt werden kann. Diese Anteile werden beispielsweise für die veränderliche Leiteinwirkung durch die Gleichungen $Q_{1,qper} = \psi_2 \cdot Q_1$ und $Q_{1,inst} = (1 - \psi_2) \cdot Q_1$ definiert. Wie in Abbildung 1 ersichtlich fließen die veränderlichen Einwirkungen sowohl in die Langzeit-Verformungen (=Kriechen) des Verformungsanteils w_2 als auch in die instantane Verformung w_3 ein.

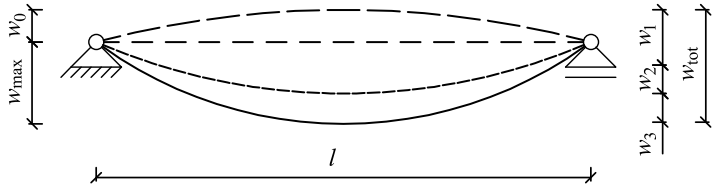


Abbildung 1: Vertikale Verformungen lt. [3]

Dabei ist

- w_{max} die verbleibende Restverformung unter Berücksichtigung der Überhöhung;
- w_0 die Überhöhung des unbelasteten, tragenden Bauteils;
- w_1 die anfängliche elastische Verformung auf Grund der ständigen Einwirkungen und des quasi-ständigen Anteils der veränderlichen Einwirkungen der relevanten Lastkombination;
- w_2 der Langzeit-Kriechanteil der Verformungen auf Grund der ständigen Einwirkungen und des quasi-ständigen Anteils der veränderlichen Einwirkungen der relevanten Lastkombination;
- w_3 die instantane, elastische Verformung auf Grund veränderlicher Einwirkungen *ohne* deren quasi-ständigen Anteil
- w_{tot} Gesamtverformung als Summe von w_1, w_2, w_3
- l Spannweite

Die bisher verwendeten Bezeichnungen w_{inst}, w_{creep}, w_{fin} und $w_{net,fin}$ wurden aufgehoben.

Die Gesamtverformung w_{tot} bzw. die verbleibende Restverformung w_{max} kann entsprechend den Gleichungen (1) und (2) berechnet werden.

$$w_{\max} = w_{tot} - w_0 \tag{1}$$

$$w_{tot} = w_1 + w_2 + w_3 \tag{2}$$

3.2. Verformungen unter Berücksichtigung der Kriecheigenschaften der Bauteilkomponenten

Bei einer Kombination aus Materialien mit gleichem Kriechverhalten wird die Bestimmung der Gesamtverformung mit den bisher schon bekannten Ansätzen durchgeführt. Unterschieden wird die Berechnung von w_{tot} basierend auf der verwendeten charakteristischen (seltenen), der häufigen und quasi-ständigen Lastkombination. Dabei werden im Abschnitt 9.2.2 die Lastkombinationen in Übereinstimmung zur EN 1990 angegeben.

In Österreich ist in einer Nationalen Erläuterung der ÖNORM B 1995-1-1 zum Kapitel 7.2 zur Vermeidung nicht umkehrbarer Auswirkungen am Tragwerk (z.B. Vermeidung von Schäden an nachgeordneten Bauteilen), der Nachweis der elastischen Anfangsverformungen für die charakteristische Kombination von Einwirkungen nach EN 1990 zu führen. Die häufige Kombination ist dafür nicht angegeben, da diese für übliche Deckenkonstruktionen im Holzbau nur sehr selten maßgebend werden kann.

Zur Berechnung der Verformungen von Bauteilen aus zusammengesetzten Komponenten mit unterschiedlichem Kriechverhalten werden in der neuen Ausgabe genauere Angaben gemacht. Durch die nichtlineare Beziehung zwischen Einwirkung und Verformung sind zwei separate Bestimmungenen für w_1+w_2 und w_3 vorgesehen. Für die charakteristische und häufige Kombination können w_1 + w_2 gemeinsam unter Berücksichtigung von $E_{mean,fin}$, $G_{mean,fin}$ und $K_{SLS,fin}$ berechnet werden. Die bei all diesen Nachweisen der Verformungen zu berücksichtigenden Verformungsbeiwerte k_{def} wurden mit dem vorliegenden Normenentwurf mit der Tab. 5.4 deutlich erweitert.

Die instantane Verformung w_3 ist durch eine separate Berechnung der Verformungen der relevanten Lastkombination der veränderlichen Einwirkungen mittels E_{mean}, G_{mean} und K_{SLS} zu bestimmen. Die quasi-ständige Kombination beinhaltet generell nur die Verformungsanteile w_1 und w_2.

4. Schwingungsnachweise nach prEN 1995-1-1

Generell werden die Deckensysteme mit der neuen Ausgabe in unterschiedliche Kategorien unterteilt. Dadurch können Grenzwerte der einzelnen Nachweise besser abgestuft werden. Die Anforderungen bezogen auf das Schwingungsverhalten des Bauwerks bzw. Bauteile oder Komponenten davon werden durch das sogenannte Boden-Performance-Level (BPL) in den Kriterien I bis VI definiert. Diese Einteilung liegt dabei der Basiskurve ISO 10137:2007 [7] zugrunde mit R als Multiplikator.

Tabelle 2: Bodenschwingungskriterien entsprechend dem Boden-Performance-Level (Tab. 9.2, prEN 1995-1-1)

	Boden-Performance-Level					
Kriterien	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**
Responsefaktor R	4	8	12	24	36	48
Oberer Auslenkungsgrenzwert $w_{lim,max}$ in mm	0,25		0,5	1,0	1,5	2,0
Steifigkeitskriterium für alle Böden	$w_{1kN} \leq w_{lim}$ mm					
Frequenzkriterien	$f_1 \geq 4{,}5$ Hz					
Beschleunigungskriterien für Bemessungssituation mit resonanten Schwingungen ($f_1 < f_{1,lim}$)	$a_{rms} \leq 0{,}005 \cdot R$ m/s²					
Geschwindigkeitskriterien für alle Böden	$v_{rms} \leq 0{,}0001 \cdot R$ m/s					

4.1. Schwingungen durch Schritte

Es werden Gehfrequenzen je nach Nutzungskategorie von 1,5 Hz bzw. 2 Hz angegeben. Für Böden auf denen ungehindert über 10 m in eine Richtung gegangen werden kann, wird für die Berechnung sogar eine Gehfrequenz von 2,5 Hz definiert (genauere Regelungen sind auch im Anhang G zu finden). Der Grenzwert für die erste Eigenfrequenz $f_{1,\mathrm{lim}}$ ist das Vierfache der zu verwendenden Gehfrequenz, jedoch immer größer als 8 Hz für BPL I-V und 7 Hz für BPL VI. Die resonante Reaktion und damit Überprüfung der Schwingbeschleunigung ist für Böden mit einer ersten Eigenfrequenz kleiner $f_{1,\mathrm{lim}}$ durchzuführen. Diese Vorgehensweise ist vergleichbar mit der aktuell detaillierten Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit lt. Nationalem Anwendungsdokument in Österreich. Das folgende Formelwerk gilt für Böden mit ein- und zweifeldrig gespannten Deckensystemen. Für komplexe Deckenstrukturen wird auf den Anhang G in der prEN 1995-1-1:2023 verwiesen.

4.2. Eigenfrequenz und Steifigkeitskriterium

Die Formel zur Ermittlung der ersten Eigenfrequenz aus [2] wird um die Faktoren $k_{\mathrm{e},1}$ und $k_{\mathrm{e},2}$ erweitert (siehe Gleichung (3)). Diese Faktoren berücksichtigen einerseits die Spannweite auf starren Auflagern sowie die Wirkung der Querbodensteifigkeit. Dabei wird l als Spannweite des Bodens $(EI)_l$ als Biegefestigkeit in Richtung der Spannweite und m als Bodenmasse je Flächeneinheit definiert. Die k-Faktoren sind ähnlich zu den Werten in [4], wobei hier $k_{\mathrm{e},1}$ dem Wert von $k_{\mathrm{e},2}$ entspricht und umgekehrt. Weitere Gleichungen zur Berechnung der Eigenfrequenz für Böden mit beispielsweise nichtstarren Auflagerbedingungen oder elastischen Zwischenlagern sind in der prEN 1995-1-1 ebenfalls enthalten.

$$f_1 = k_{\mathrm{e},1} \cdot k_{\mathrm{e},2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \tag{3}$$

Die Steifigkeit wird durch die maximale Auslenkung (Ablenkung) einer statischen Punktlast von F=1 kN an der ungünstigsten Position mit maximaler Amplitude bestimmt. Bei Einfeldträger-Systemen wird diese in der Mitte des Bodens platziert und $w_{1\mathrm{kN}}$ berechnet sich gemäß Gleichung (4). Werte für die mitwirkende effektive Breite b_{ef} durch die querverteilende Wirkung bei Deckensystemen sind ebenfalls enthalten und unterscheiden sich von den Angaben in [4] nur geringfügig. Ebenfalls ist die Berechnung zufolge der flexiblen Lagerung durch beispielsweise Unterzüge definiert.

$$w_{1\mathrm{kN}} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot (EI)_l \cdot b_{\mathrm{ef}}} \tag{4}$$

Die Bodenmasse m im Frequenznachweis und auch zur Berechnung der modalen Masse M^* für den Nachweis der Beschleunigung a_{rms} ist im neuen Entwurf nun als die Summe der ständigen Lasten, dem Eigengewicht des Bodens (inkl. aller getragenen und hängenden horizontalen strukturellen Lagen, sowie dem Anteil von Trennwänden) und einer zusätzlichen Masse als Äquivalent von 10 % der charakteristischen Nutzlasten definiert.

Die in den Formelwerken verwendete Bezeichnung $(EI)_{\mathrm{L}}$ bzw. $(EI)_{\mathrm{T}}$ die im Üblichen als Abkürzungen für die Biegesteifigkeiten von Bauteilen verwendet werden, sind dabei als sogenannte *sichtbare (scheinbare) Steifigkeit* unter Berücksichtigung der Biegeverformungen, Schubverformungen (Stichwort Schubnachgiebigkeit bei Brettsperrholzelementen) und der Fugenverschiebungen zu verstehen, und wird mitunter vom jeweiligen Lastfall beeinflusst.

Neu im vorliegenden Normenentwurf ist auch der Hinweis, dass die Biegesteifigkeit von Fußbodenaufbauten, wie zum Beispiel dem Nassestrich, in den Schwingungsnachweisen angesetzt werden kann. Anmerkung: Der E-Modul für einen Estrich E 225 kann dabei mit 8.000 bis 10.000 N/mm² angenommen werden [8].

4.3. Beschleunigungs- und Geschwindigkeitskriterien

Neu in der Ausgabe prEN 1995-1-1:2023 ist die Aufnahme von Nachweisen zur Schwinggeschwindigkeit. Außerdem werden nun bei der Schwingbeschleunigung und auch bei der effektiven Schwinggeschwindigkeit nicht mehr die Spitzenwerte sondern Effektivwerte berechnet (Faktor $\sqrt{2}$) und mit den definierten Grenzwerten verglichen. Die Beschleunigung berechnet man gemäß Gleichung (5) aus der vertikalen, dynamischen Kraft F_{dyn}, dem modalen Dämpfungsgrad ζ, der modalen Masse M^* sowie mit Hilfe der Faktoren k_{res} und μ_{res} zur Berücksichtigung höherer Modi und dem resonanten Aufbaufaktor. Gleichungen für k_{res} und sind für spezielle Fälle definiert.

$$a_{\mathrm{rms}} = \frac{k_{\mathrm{res}} \cdot \mu_{\mathrm{res}} \cdot F_{\mathrm{dyn}}}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \zeta \cdot M^*} \tag{5}$$

Die gesamte Spitzengeschwindigkeitsreaktion $v_{tot,peak}$ wird mithilfe der Spitzengeschwindigkeitsreaktion $v_{1,peak}$ und dem Faktor k_{imp} zur Berücksichtigung höherer Schwingungsmodi berechnet. Ein weiterer Faktor, welcher für den Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit v_{rms} (Gleichung (6)) benötigt wird, ist neben der ersten Eigenfrequenz f_1 und dem modalen Dämpfungsgrad ζ auch der Faktor η.

$$v_{\mathrm{rms}} = v_{\mathrm{tot,peak}} \cdot (0{,}65 - 0{,}01 \cdot f_1) \cdot (1{,}22 - 11{,}0 \cdot \zeta) \cdot \eta \tag{6}$$

mit

$$\eta = \begin{cases} 1{,}35 - 0{,}4 \cdot k_{imp} & wenn\colon 1{,}0 \le k_{imp} \le 1{,}9 \quad sonst\ \eta = 0{,}59 \ \ (f\ddot{u}r\ Holzbalkendecken) \\ 1{,}35 - 0{,}4 \cdot k_{imp} & wenn\colon 1{,}0 \le k_{imp} \le 1{,}7 \quad sonst\ \eta = 0{,}67 \ \ (f\ddot{u}r\ alle\ anderen\ Decken) \end{cases} \tag{7}$$

4.4. Schwingungskriterien

In der prEN 1995-1-1 wird zwischen resonanter ($f_1 < f_{1,lim}$) und transienter Schwingung ($f_1 \geq f_{1,lim}$) unterschieden und dabei die zu erfüllenden Kriterien festgelegt. Der Grenzwert der Auslenkung (Ablenkung) w_{1kN} für das Steifigkeitskriterium wird mit Gleichung (8) definiert.

$$0{,}5 \le w_{1\mathrm{kN}} = \begin{cases} w_{\mathrm{lim,max}} & f\ddot{u}r \quad w_{\mathrm{lim,max}} \le 0{,}5 \\ \dfrac{150 \cdot R}{l} \le w_{\mathrm{lim,max}} & f\ddot{u}r \quad w_{\mathrm{lim,max}} > 0{,}5 \end{cases} \tag{8}$$

Die Werte für $w_{lim,max}$ sind als obere Ablenkungsgrenzwerte in Tabelle 2 (Tab. 9.2, prEN 1995-1-1) zu finden.

Eine empfohlene Auswahl von BPL für die Anwendungskategorien A (Wohnräume) und B (Büroräume) sind in Tabelle 3 (Tab. 9.3, prEN 1995-1-1) enthalten. Die Einteilung Schwingungskriterien erfolgt hierbei nach Gesichtspunkten der Qualität und Effizienz und sind als national definierte Parameter (NDP) zu bestimmen.

Tabelle 3: Empfohlene Auswahl von Boden-Performance-Levels (Tab. 9.3, prEN 1995-1-1)

Kriterien	**Qualitätswahl**	**Grundauswahl**	**Effiziente Auswahl**
A (Wohnräume) - Mehrfamilienhaus - Einfamilienhaus	 Level I, II, III Level I, II, III, IV	 Level IV Level V	 Level V Level VI
B (Büroräume)	Level I, II, III	Level IV	Level V

5. Druckverformung senkrecht zur Faser

Neu aufgenommen wurde in der prEN 1995-1-1 auch die Berechnung der Verformungen zufolge Druckbeanspruchungen rechtwinklig zur Faserrichtung. Die Beanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung $f_{c,90,SLS}$ ist dabei mit 80 % von $f_{c,90,d}$ im Grenzzustand der Tragfähigkeit im linear elastischen Bereich anzusetzen. Hier wird im Vergleich zur aktuellen Ausgabe der EN 1995-1-1 ein neuer Ansatz verwendet und neben dem Lastausbreitungsfaktor $k_{c,90}$ auch der Faktor k_{mat} eingeführt. Bei der Auswahl k_{mat} (Tab. 8.1, prEN 1995-1-1) ist der Fall A zu wählen mit dem die meisten Bemessungssituationen abgedeckt sein sollten. Durch dieses neue Bemessungskonzept werden für BSH Träger Stauchungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit von bis zu 2,5 % akzeptiert und für k_{mat} darf 1,4 angenommen werden. Für einen Träger aus GL 24c mit einer Höhe von 360 mm und einer punktuellen Lasteinleitung bzw. Auflagerung auf einem z.B. schmalen I-Profil mit einer Breite des Gurtes von 80 mm, könnte somit eine charakteristische Druckfestigkeit rechtwinklig zur Faserrichtung von $f_{c,90,k}$ = 7,4 N/mm² angesetzt werden. Rein theoretisch sind durch die Begrenzung von $k_{c,90} \leq 4,0$ nach Gleichung (8.6) in der prEN 1995-1-1 Werte von $f_{c,90,k} \leq 4,0 \cdot 1,4 \cdot 2,5 = 14$ N/mm² im Fall A möglich. Für die Berechnung von $f_{c,90,SLS}$ dürften somit für den Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit $0,8 \cdot 14 = 11,2$ N/mm² angesetzt werden.

Aktuelle Untersuchungen an der Universität Innsbruck zeigen, dass diese Ansätze zu sehr hohen Werten mit ausgeprägten irreversiblen Verformungen führen. Auch die Hinweise zur Verwendung von Kriechfaktoren bei einer Druckbeanspruchung rechtwinklig zur Faserrichtung des Holzes mit $2 \cdot k_{def}$ ist somit zu hinterfragen, da dieses Phänomen bei den erlaubten Lastniveaus durch die irreversiblen, plastischen Verformungen zur Gänze überlagert wird.

6. Literatur

[1] Winter, S.; Die Evolution des Eurocode 5 – ein Überblick mit Schwerpunkt auf der DIN EN 1995-1-1, Internationales Holzbau Forum IHF, Innsbruck, 2023.

[2] EN 1995-1-1:2004; Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, + AC (2006) + A1 (2008) + A2 (2014). CEN European committee for standardization, Brüssel, Belgien.

[3] prEN 1995-1-1:2023-10; Eurocode 5 – Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau (Normentwurf)

[4] ÖNORM B 1995-1-1:2023-08; Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holz bauten - Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau – Nationale Festlegungen zur Umsetzung der ÖNORM EN 1995-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen. ASI Austrian Standards International, Wien.

[5] DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08; Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Holzbau. DIN, Berlin.

[6] Winter, S.; Hamm, P.; Richter, A.; Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken. Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15283. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Technische Universität München. 2010

[7] ISO 10137:2007; Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations. International Organization for Standardization.

[8] Reuß, S.; Schwingungsverhalten von Decken aus Brettsperrholz. Masterarbeit Universität Innsbruck, 2023

Alles schwingt – Erfahrungen mit einem XXL-Deckenprüfstand

Patricia Hamm
Institut für Holzbau
Hochschule Biberach
Biberach, Deutschland



Alles schwingt – Erfahrungen mit einem XXL-Deckenprüfstand

Hinweis:
Diese Inhalte wurden in ganz ähnlicher Form bereits im September 2023 im Rahmen der 5. Aachener Holzbautagung unter dem Titel «Schwingungsverhalten von weitgespannten Holzdecken; Versuche am Prüfstand mit 12,5 m x 12,5 m» von P. Hamm, V. Knöpfle und J. Ruf veröffentlicht.

1. Kurzfassung

Die Hochschule Biberach arbeitete in Kooperation mit der PIRMIN JUNG Deutschland GmbH, Remagen, an der Entwicklung eines leichten, schwingungsoptimierten Deckensystems für Deckenspannweiten über 8 m. Der Fokus in diesem Projekt lag vor allem auf der Größe des untersuchten Systems. Bestehende Ansätze zur Bemessung der Gebrauchstauglichkeit von Holzdecken stoßen bei weitgespannten Holzdecken mit Spannweiten über 8 m an ihre Grenzen. Deshalb wurde ein Prüfstand mit den Gesamtabmessungen von 12,5 m x 12,5 m im Maßstab 1:1 und der Möglichkeit einer nachgiebigen Lagerung gebaut. Es konnten unterschiedliche Deckensysteme mit Spannweiten von bis zu 12 m gemessen und bewertet werden. Die wichtigsten Ergebnisse sind: Selbst eine einzelne Person kann diese große und schwere Decke zu deutlich spürbaren Schwingungen anregen. Ebenso hat eine Person auf der Decke Einfluss auf das Lehr'sche Dämpfungsmaß der Decke, wobei insgesamt eine eher geringe Dämpfung beobachtet wurde. Die mitschwingende Masse hat Einfluss auf das subjektive Empfinden der Schwingungen, wobei die mitschwingende Masse von den Lagerungsbedingungen und der Biegesteifigkeit in Querrichtung beeinflusst wird. Bei einer vierseitigen Lagerung konnte eine mitschwingende Masse von ca. 20-30% ermittelt werden; bei einer zweiseitigen Lagerung waren es zwischen 30-45 %.

2. Einleitung

Von Januar 2021 bis Juni 2023 arbeitete die Hochschule Biberach in Kooperation mit der PIRMIN JUNG Deutschland GmbH, Remagen, an der Entwicklung eines leichten, schwingungsoptimierten Holzdeckensystems mit Unterzügen für große Spannweiten. Es gibt bereits Forschungsarbeiten, die sich mit dem Schwingungsverhalten von Holzdecken beschäftigen. Der neue Fokus in diesem Projekt liegt vor allem auf der Größe des untersuchten Systems. Bauwerke wie Schulen, Verwaltungs- und Bürogebäude erfordern Decken mit sehr großen Stützenabständen und daher sehr großen Spannweiten. Es wurden unterschiedliche Deckensysteme mit unterschiedlichen Aufbauten, Lagerungsbedingungen und Spannweiten gemessen und bewertet. Das Forschungsprojekt umfasste theoretische und praktische Betrachtungen des Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holzdecken mit großen Spannweiten und Unterzügen.

3. Aktuelle Bemessungsregeln in Normen und Literatur

3.1. Frühere Forschungen

Aufbauend auf dem schon lange im Eurocode 5 [1] existierenden Schwingungsnachweis wurde von 2007 bis 2009 ein Forschungsprojekt an der Technischen Universität München durchgeführt [2]. Das Forschungsprojekt zeigte, dass Decken mit Eigenfrequenzen unterhalb der Grenzfrequenz von f_{grenz} = 8 Hz hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit gut funktionieren, wenn zwei Bedingungen gegeben sind:

Die Frequenz muss größer als die Mindestfrequenz von f_{min} = 4,5 Hz sein und die Beschleunigung beim Gehen in Resonanz mit der zweiten oder dritten Harmonischen muss kleiner als eine Grenzbeschleunigung a_{grenz} sein.

Der Nachweis der Beschleunigung gelingt nur bei schweren Decken, wie Holz-Beton-Verbundsystemen oder Systemen mit großen Spannweiten. Das folgende Flussdiagramm (vgl. Bild 1) zeigt den Nachweis von Schwingungen nach [2].

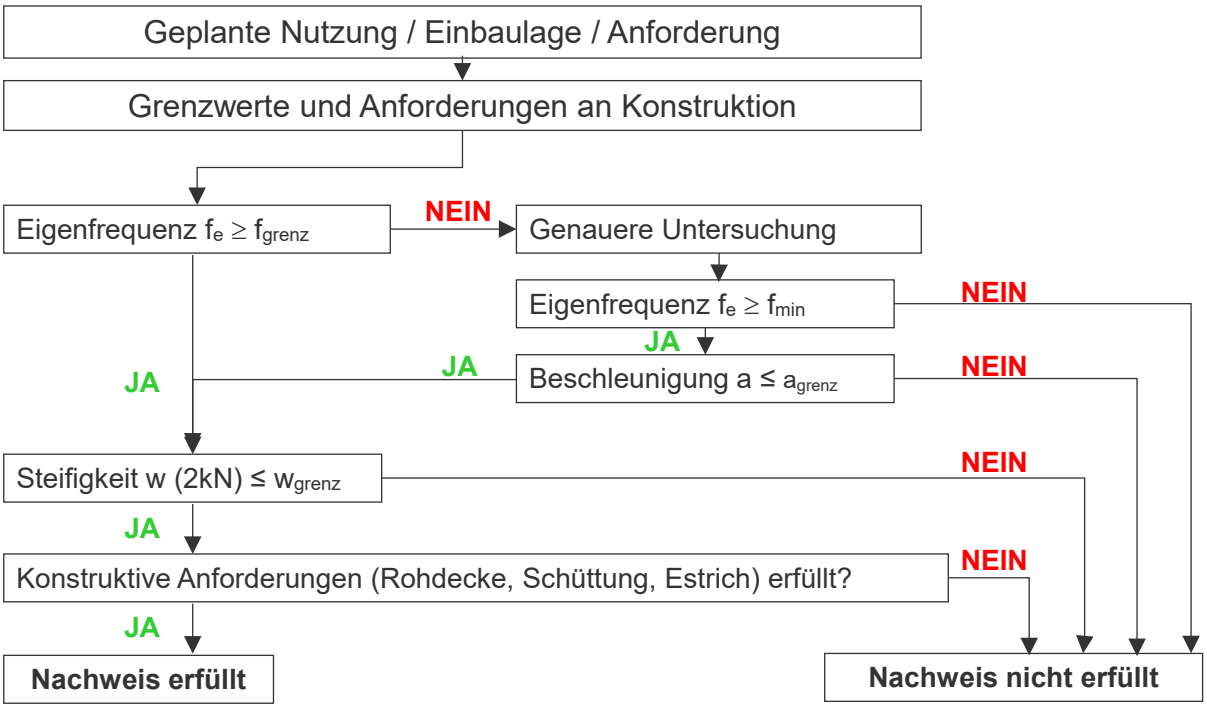


Abbildung 1: Konstruktions- und Bemessungsregeln nach [2]

3.2. Entwurf Eurocode 5

Der Grundgedanke des neuen Entwurfs des Eurocode 5 [3] liegt darin, die Regeln so zu ändern, dass die Wahrnehmung maßgeblich in die Bemessung einfließt. Daher wurde der Response factor R eingeführt. Die Sensitivität der Wahrnehmung hängt – wie in der ISO 10137 [9] dargestellt – von der Eigenfrequenz der Decke ab. Somit werden die Grenzwerte bzw. Nachweise in Abhängigkeit der Eigenfrequenz und den Anforderungen durchgeführt.

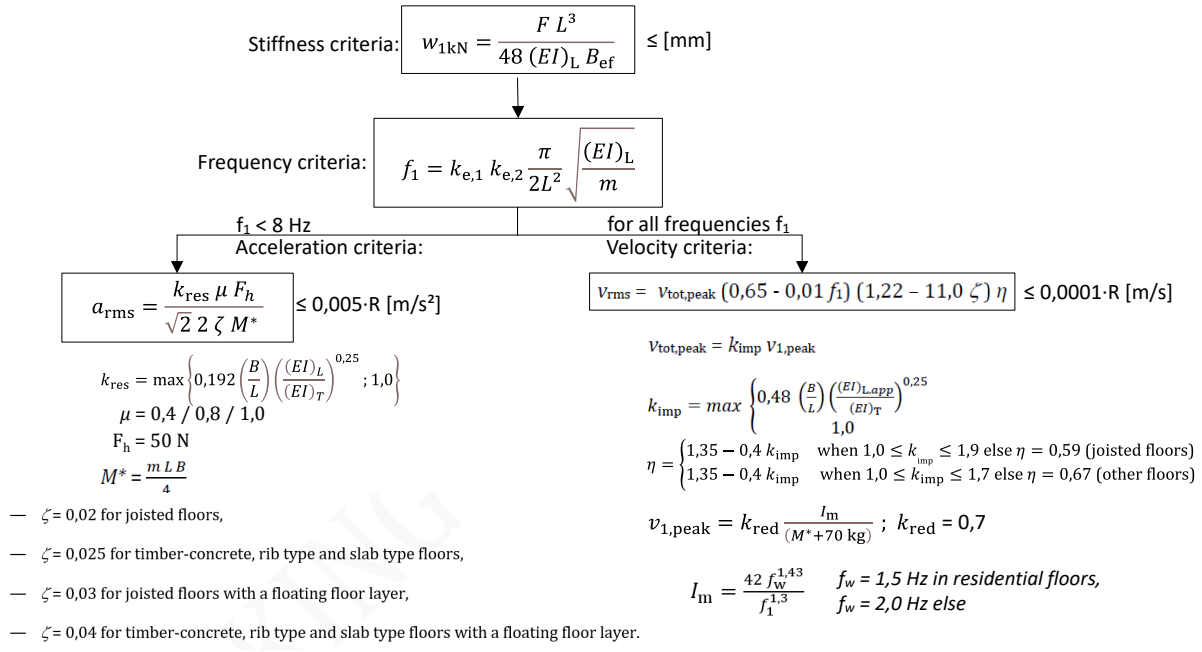


Abbildung 2: Flussdiagramm und Gleichungen nach [3]

Bild 2 zeigt den prinzipiellen Weg und die wichtigsten Gleichungen des Nachweises (siehe auch [4]). Tabelle 1 zeigt den Response factor R jeweils in Abhängigkeit von einem zu wählenden Floor performance level, sowie die Grenzwerte der Durchbiegung infolge einer statischen Einzellast, der Beschleunigung und der Geschwindigkeit vgl. [3]. Hinweis: Es ist damit zu rechnen, dass sich ach Eingang und Überarbeitung der Kommentare zum Entwurf die Grenzwerte noch ändern werden. Die hier Gezeigten sind vom Stand April 2023.

Tabelle 1: Grenzwerte und Response factor R je nach Floor performance Level nach [3]

	Floor performance Level					
Kriterium	I	II	III	IV	V	VI
Response factor R	4	8	12	24	36	48
Steifigkeitskriterium; $w_{lim,max}$ [mm] ≤	0,25		0,5	1,0	1,5	2,0
Steifigkeitskriterium, w_{1kN} [mm] ≤				$0{,}5 \leq w_{lim} = \frac{150R}{L} \leq w_{lim,max}$		
Frequenzkriterium; f_1 [Hz] ≥	4,5					
Beschleunigungskriterium; Resonanzschwingungen: (f_1 < 8 [Hz]); a_{rms} [m/s²] ≤	0,005 R					
Geschwindigkeitskriterium; transiente Schwingungen: für alle Decken; v_{rms} [m/s] ≤	0,0001 R					

4. Motivation

Werden die Nachweisverfahren aus Kapitel 2 näher betrachtet, ergeben sich die im folgende Ergebnisdiagramm zu erkennenden Zusammenhänge.

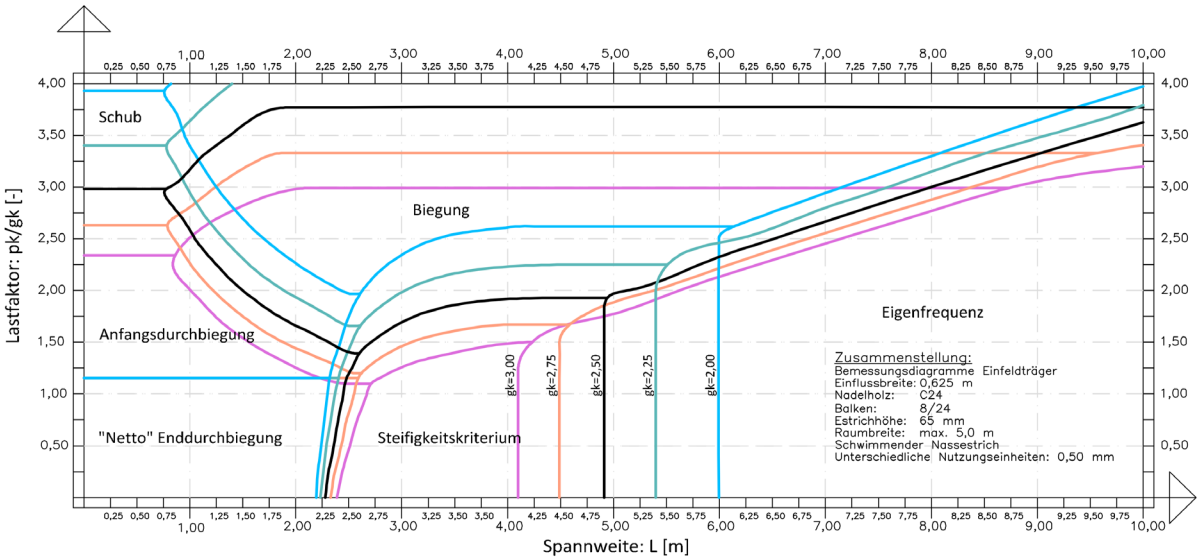


Abbildung 3: Bemessungsrelevanter Nachweis für Decken in Abhängigkeit von der Spannweite, basierend auf [2], entnommen aus [5].

Bei großen Spannweiten wird, wie in Bild 3 zu sehen, das Frequenzkriterium massgebend. Daher ist es wichtig, Decken mit großen Spannweiten hinsichtlich ihres tatsächlichen Schwingungsverhaltens intensiver zu betrachten. Dies soll mithilfe eines Prüfstands in dem Maßstab 1:1, welcher im folgenden Kapitel erläutert wird, erfolgen.

5. Aufbau des Prüfstands

Der Schwingungsnachweis ist ein Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Das Wichtigste ist, dass sich die Nutzer der Decke sicher und wohl fühlen. Um herauszufinden, wie sich Menschen auf der Decke fühlen, wird ein Prüfstand im Maßstab 1:1 gebaut, so dass alle Auswirkungen gemessen und gefühlt werden können. Dieser Prüfstand hat eine Fläche von 12,5 m x 12,5 m und besteht aus Kastenelementen. Der Aufbau des Prüfstandes ist in den Bildern 4 bis 7 dargestellt. Detaillierte Informationen zur Planung und zum Aufbau finden sich in [6].



Abbildung 4: Zusammenbau zu Elementen



Abbildung 5: Rohdecke ohne Beplankung

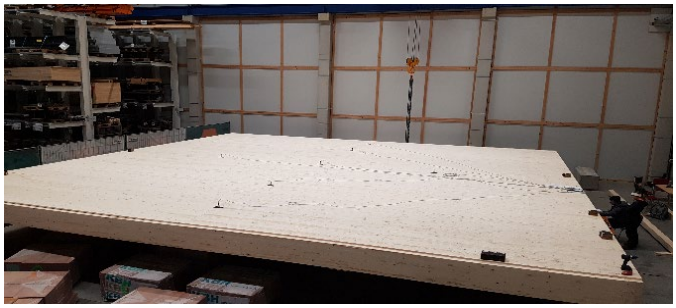


Abbildung 6: Rohdecke mit Beplankung

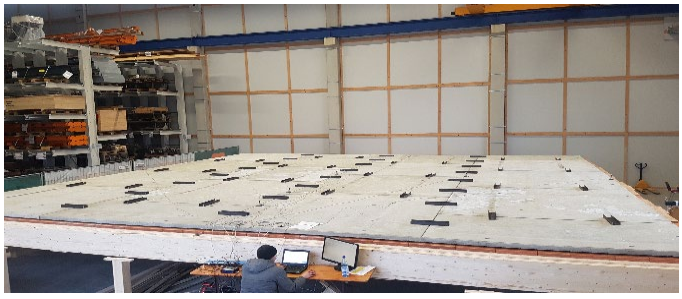


Abbildung 7: Prüfstand mit Masse und Estrich

6. Messungen am Prüfstand

6.1. Änderungen in der Konstruktion

Der Prüfstand wurde flexibel gestaltet, um unterschiedliche Deckenaufbauten und Lagersituationen abbilden zu können. Die verschiedenen Aufbauten und Kombinationen können den Bildern 8 und 9 entnommen werden.

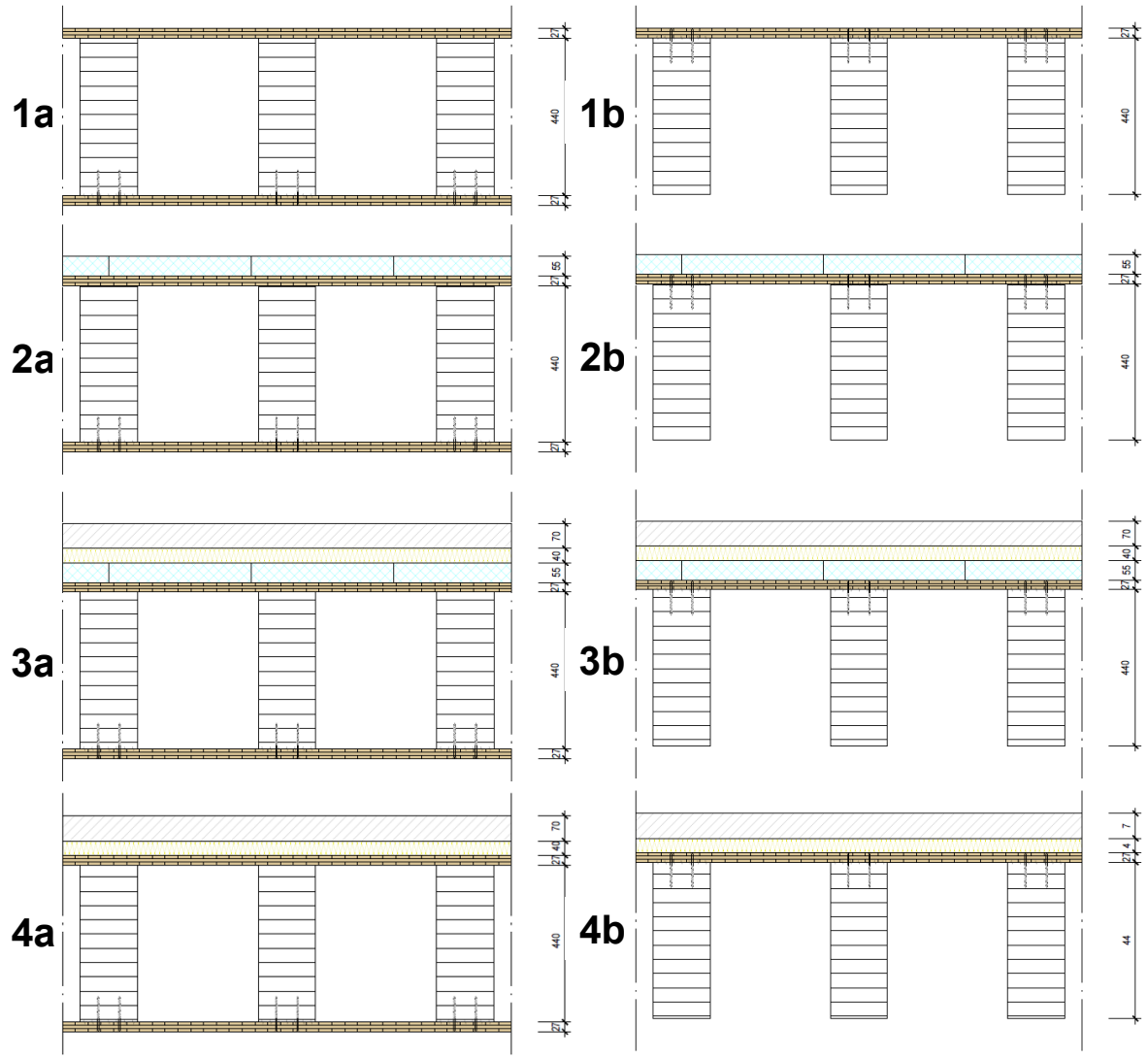


Abbildung 8: Unterschiedliche Konstruktionen und Aufbauten der Decke

Type 1: Rohdecke. Die Tragkonstruktion sind Kastenelemente (1a) bzw. Rippen (2a).
Type 2: Rohdecke mit Masse. Die Masse wird durch Pflastersteine realisiert.
Type 3: Rohdecke mit Masse, Trittschalldämmung und Nassestrich.
Type 4: Rohdecke, Trittschalldämmung und Nassstrich.

Mit Hilfe des Prüfstands konnte die Spannweite zwischen 8 m bis 12 m variiert werden. Eine weitere Besonderheit war die Veränderung der Lagersituation: Es ist möglich, sowohl eine zwei- (Zs) als auch vierseitige (Vs) Lagerung auf Wänden darzustellen. Zusätzlich kann eine elastische Lagerung durch einen Unterzug aus Holz (Uz) als auch durch einen Stahlunterzug dargestellt werden.

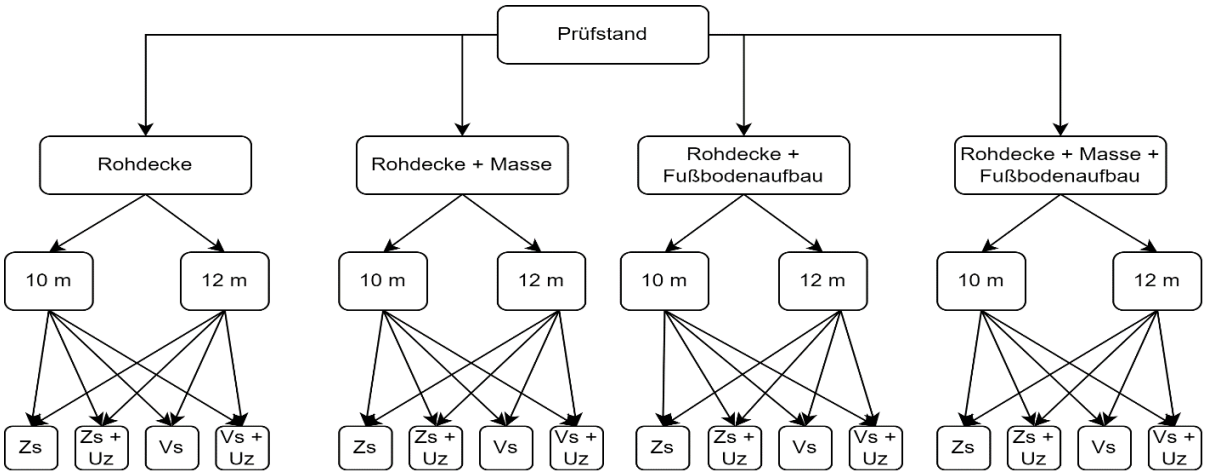


Abbildung 9: Modifikationen der Konstruktion, der Spannweite und der Lagerung

6.2. Anregung

Zur Anregung der Decke wurden unterschiedliche Methoden angewendet. Zunächst wird ein Heeldrop durchgeführt (siehe Bild 10), um die Eigenfrequenzen, Dämpfung und Geschwindigkeit zu messen. Die tägliche Nutzung wird mit einer gehenden Person abgebildet. Mit dieser Messung wird die Geschwindigkeit (vrms) betrachtet.
Neben dem Impuls und dem regellosen Gehen wurde die Decke durch Joggen in Eigenfrequenz zu Resonanzschwingungen angeregt. Ebenso kam ein Shaker (siehe Bild 11) zum Einsatz. Mit diesem Shaker kann eine definierte Kraft erzeugt werden und dadurch die mitschwingende Masse ermittelt werden.



Abbildung 10: Anregung Heeldrop

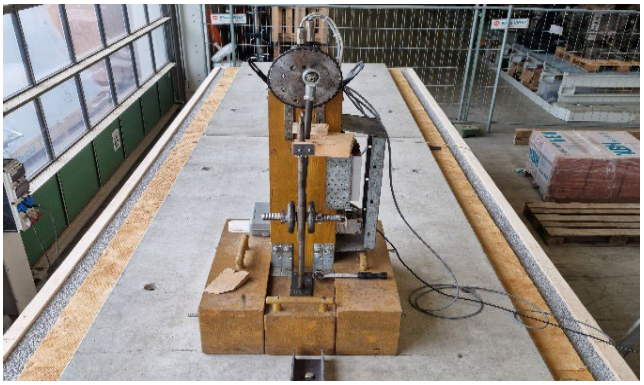


Abbildung 11: Mechanischer Shaker

6.3. Subjektive Bewertung

Einer der wichtigsten Punkte ist die subjektive Bewertung der Schwingungen. Die Schwingungen wurden von den Probanden JR und VK bewertet und mit Besuchergruppen und den anderen Beteiligten abgeglichen. Die verwendeten Noten orientieren sich an dem Forschungsbericht [2] und Kreuzinger/Mohr [7].

7. Ergebnisse der Messung

Die Kombination der unterschiedlichen Aufbauten und Lagerungsbedingungen führt zu vielen Messsituationen:

Tabelle 2: Übersicht über die Kombinationen bei der Kastendecke, Frequenz Dämpfungsmaß und Geschwindigkeit

Konstruktionstypen	Spannweite [m]	Lagerung	Unterzug	gemessene Frequenz [Hz]	Dämpfungsmaß inkl. Person [%]	vrms [mm/s]
1a	9	2-seitig	Stahl	5,4	1,0	2,11
1a	10	4-seitig		9,3	1,7	1,00
1a	10	4-seitig	Holz	7,5	1,3	1,24
1a	10	2-seitig		9,1	1,3	1,40
1a	10	2-seitig	Holz	7,4	1,4	1,20
1a	12	4-seitig		7,2	1,4	1,48
1a	12	4-seitig	Holz	6,1	1,6	1,21
1a	12	2-seitig	Holz	6,0	2,4	1,38
2a	10	4-seitig		7,2	1,2	1,51
2a	10	4-seitig	Holz	5,7	1,6	1,03
2a	10	2-seitig		7,0	1,1	2,33
2a	10	2-seitig	Holz	5,5	1,3	1,18
2a	12	4-seitig		5,3	1,4	2,43
2a	12	2-seitig		5,1	1,1	2,13
2a	12	2-seitig	Holz	4,4	1,3	1,20
2a	12	2-seitig	Stahl	4,0	1,0	1,35
3a	10	4-seitig		6,2	1,8	0,61
3a	10	4-seitig	Holz	4,9	1,8	0,90
3a	10	2-seitig		5,8	1,7	0,49
3a	10	2-seitig	Holz	4,8	1,7	0,60
3a	10	2-seitig	Stahl	4,1	1,3	0,64
3a	12	4-seitig		4,6	2,2	0,54
3a	12	4-seitig	Holz	4,1	1,8	0,48
3a	12	2-seitig		4,4	1,7	0,51
3a	12	2-seitig	Holz	3,9	1,6	0,50
4a	10	4-seitig		6,8	1,9	1,37
4a	10	4-seitig	Holz	5,2	1,9	2,20
4a	10	2-seitig		6,6	1,6	1,03
4a	10	2-seitig	Holz	5,2	1,7	2,01
4a	12	4-seitig		5,2	1,7	2,54
4a	12	4-seitig	Holz	4,3	1,7	0,75
4a	12	2-seitig		4,9	1,4	1,15
4a	12	2-seitig	Holz	4,2	1,5	0,61

7.1. Frequenz, Dämpfung, Geschwindigkeit

Tabelle 2 zeigt einige der Kombinationen, die Eigenfrequenz der ersten Schwingungsform, das Dämpfungsmaß und der quadratische Mittelwert der Geschwindigkeit v_{rms}. Dieser Wert wird durch eine regellos gehende Person erzeugt und als Durchschnitt über mehrere Schritte gemessen.

Die Eigenfrequenz wird deutlich von der Masse der Konstruktion, der Spannweite und der elastischen Lagerung beeinflusst.

Das Dämpfungsmaß wird bei der Abklingkurve nach der Anregung in Resonanz gemessen. Die gemessenen Werte sind meist kleiner als 2%. Üblicherweise sind die Werte höher, sie können aus [1], [2] oder [3] wie folgt entnommen werden:

- 2,0% für Holzbalkendecken
- 2,5% für Rippendecken (Type 1a)
- 3,0% für Holzbalkendecken mit einem schwimmenden Bodenbelag (Type 3 bzw. 4)

Gründe für die geringe Dämpfung liegen vermutlich an der großen Spannweite, bzw. dem kleinen Verhältnis von Durchbiegung zu Spannweite.

Als Hauptergebnis kann festgehalten werden, dass die Schwingungen trotz der großen Masse des Prüfstandes (ca. 57 to) spürbar und manchmal störend sind. Einer der Gründe kann in dem geringen Dämpfungsmaß gefunden werden. Daher wird die Möglichkeit geprüft, abgestimmte Massedämpfer zu installieren.

7.2. Geänderte Konstruktionen

Zusätzlich zu den Konstruktionsänderungen (Typ 1a bis 4a) wurde auch ohne die zweite Drei-Schicht-Platten geprüft. Dies führte zu den Modifikationen Typ 1b bis 4b, vgl. Bild 8. Tabelle 3 zeigt einen Auszug aus den Ergebnissen der Messungen und einen Vergleich des Dämpfungsmaßes mit einer auf der Decke stehenden Person und ohne Person auf der Decke. In diesem Fall wurde die Decke durch den Shaker angeregt.
Der Vergleich von Tabelle 2 und Tabelle 3 zeigt den Einfluss der zweiten Drei-Schicht-Platte auf die Eigenfrequenz. Die Konstruktion mit nur einer Platte ist weniger steif. Dies führt zu geringeren Werten der Eigenfrequenzen.

Tabelle 3: Auszug aus Kombinationen der Rippendecke und Ergebnisse

Konstruktion	Spannweite [m]	Lagerung	Unterzug	Gemessene Frequenz [Hz]	Dämpfungsmaß inkl. person [%]	Dämpfungsmaß ohne person [%]	v_{rms} [mm/s]	R-Faktor	Floor performance Level
1b	12	2-seitig		6,20	1,9%				
2b	12	2-seitig		4,56	1,2%		2,62	26,0	V
3b	12	2-seitig		4,20	1,5%		0,73	7,3	II
3b	12	2-seitig	Holz	3,60	1,6%	1,2%	1,48	14,8	IV
3b	12	4-seitig		4,00	1,8%	1,3%	0,73	7,3	II
3b	12	4-seitig	Holz	3,60	1,7%	1,2%	1,14	11,4	III

Aus Tabelle 3 ist der Einfluss der anregenden Person auf das Lehr'sche Dämpfungsmaß ersichtlich: Das Dämpfungsmaß ist mit einer auf der Decke stehenden Person stets um 0,3% bis 0,6% höher als ohne Personen, weil die Person unbewusst gegenschwingt bzw. versucht auszugleichen. Ebenso hat die Amplitude der Decke Einfluss auf das Dämpfungsmaß, wie in Bild 12 dargestellt ist.

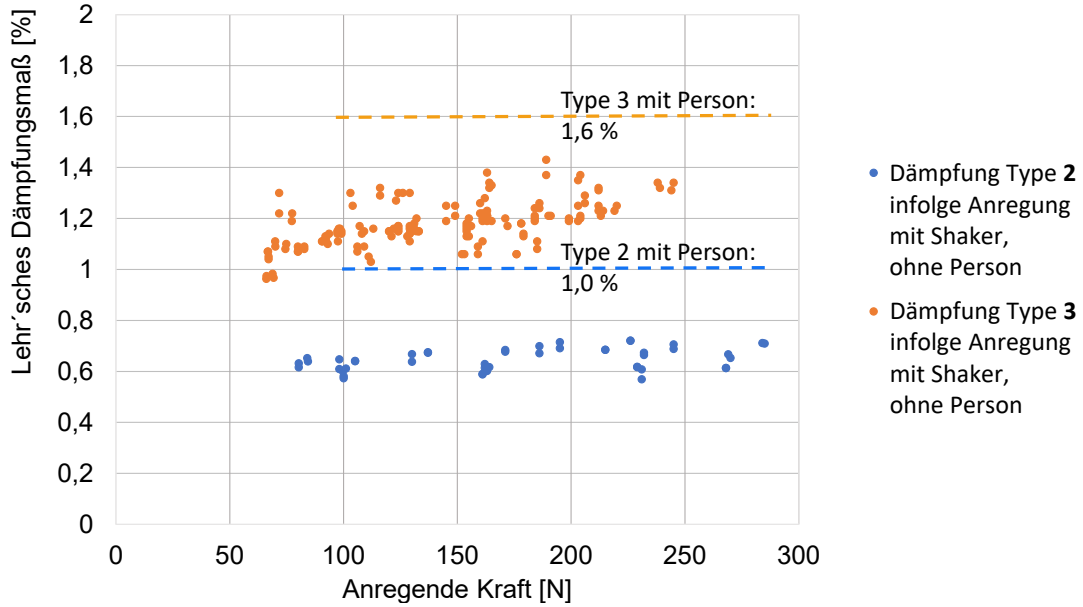


Abbildung 12: Einfluss der Personen sowie der anregenden Kraft auf das Dämpfungsmaß

7.3. Mitschwingende Masse

Die mitschwingende oder auch modale Masse hat Einfluss auf die Schwingungsamplituden und auf das subjektive Empfinden der Schwingungen. Die mitschwingende Masse wird von den Lagerungsbedingungen und der Biegesteifigkeit in Querrichtung beeinflusst. Bei einer vierseitigen Lagerung konnte eine mitschwingende Masse von ca. 20-30% ermittelt werden; bei einer zweiseitigen Lagerung waren es ca. 30-45 % (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Einflüsse auf die mitschwingende Masse

Konstruktion	Lagerung	Nachgiebige Lagerung	Estrich verbunden	Querausteifung	Absolute Masse [kg]	Modale Masse [kg]	Anteil der Modalen Masse an der absoluten Masse [%]
2b	4-seitig	-	-	-	31000	7600	24,4%
2b	4-seitig	-	-	2 Balken	31000	8600	27,8%
2b	4-seitig	Holz	-	-	31000	8900	28,6%
2b	2-seitig	-	-		31000	9200	29,7%
2b	2-seitig	-	-	2 Balken	31000	12900	41,7%
3b	4-seitig	-	Ja	-	57000	14700	25,8%
3b	4-seitig	-	Ja	3 Balken	57000	15400	27,1%
3b	4-seitig	Holz	Ja	3 Balken	57000	18000	31,7%
3b	4-seitig	-	Nein	3 Balken	57000	13400	23,5%
3b	2-seitig	-	Ja	-	57000	20600	36,1%
3b	2-seitig	-	Ja	3 Balken	57000	25800	45,3%
3b	2-seitig	-	Nein	-	57000	16900	29,6%

Wie zu erkennen ist, haben die zusätzlichen Balken zur Queraussteifung einen großen Einfluss auf die mitschwingende Masse. Auch der Verbund der einzelnen Estrichelementen untereinander hat einen Einfluss. Es kann festgestellt werden, dass mit diesen Maßnahmen die mitschwingende Masse ohne großen Aufwand erhöht werden kann, was zu geringeren Beschleunigungswerten führt und somit für den Nutzer angenehmer ist.

8. Berechnungen mit der Finite-Element-Methode

Um die Messergebnisse auf die Berechnungen zukünftiger weitgespannter Holzdecken zu übertragen, muss sichergestellt werden, dass die gemessenen Werte mit der Berechnung übereinstimmen. Dies geschah mit Hilfe eines FE-Modells, siehe Bilder 13 und 14. Das Modell wurde schrittweise, analog zum Prüfstand, aufgebaut. Dadurch konnten alle individuellen Bedingungen wie E-Modul, Masse etc. berücksichtigt werden. Die Modellierung wurde mit dem Programm «Mechanical APDL» der Firma «Ansys Inc.» durchgeführt. Der Vorteil dieses Programms ist, dass eine Automatisierung ohne großen Aufwand möglich ist. Alle verwendeten Parameter werden als Variablen gespeichert und miteinander verknüpft. Wird ein Parameter geändert, passen sich die abhängigen Werte automatisch an.

Es hat sich gezeigt, dass eine Simulation des Strukturverhaltens mit Hilfe von FE-Modellen, insbesondere unter speziellen Randbedingungen, sehr genau durchgeführt werden kann (siehe Tabelle 5). In einem ersten Schritt wurde eine Kalibrierung an den Eigenfrequenzen vorgenommen. Um dieses Modell für eine Bewertung der Schwingungen von Decken zu verwenden, sind weitere Untersuchungen notwendig. Hierfür werden beispielsweise auch die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen durch gehende und laufende Personen im nummerischen Modell Berücksichtigung finden.

Tabelle 5: Vergleich der gemessenen und berechneten Eigenfrequenzen der ersten Modi

	gemessene Frequenzen [Hz]			Berechnete Frequenzen [Hz]		
Konstruktion	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Balken	7,32	-	-	7,32	-	-
Ein Element	6,85	14,45	19,42	6,79	14,45	19,44
Rohdecke Type 1b	6,20	7,43	8,62	6,24	7,43	8,65
Type 2b	4,56	5,23	6,15	4,07	5,04	5,75
Type 3b	4,20	4,95	5,09	4,35	4,64	5,20

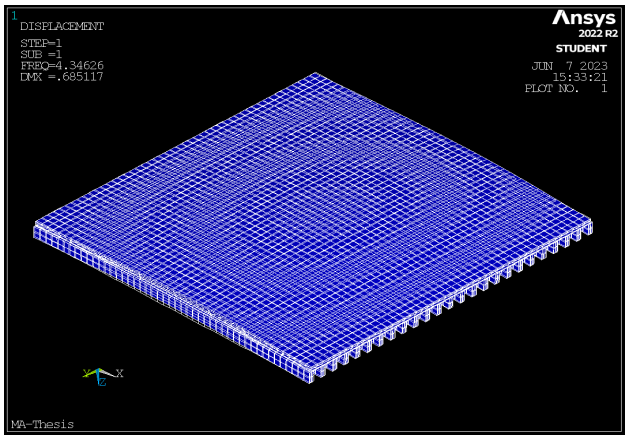


Abbildung 13: Erste Eigenform aus FE-Modell, Typ 3b

Derartige kalibrierte Modelle ermöglichen es, das Schwingungsverhalten einer anderen (ähnlichen) Holzdecke im Modell zu bestimmen, ohne dass ein aufwändiger Prüfstand und Umbau vor Ort erforderlich sind. Ausführliche Informationen zum FE-Modell und zur Kalibrierung siehe [8].

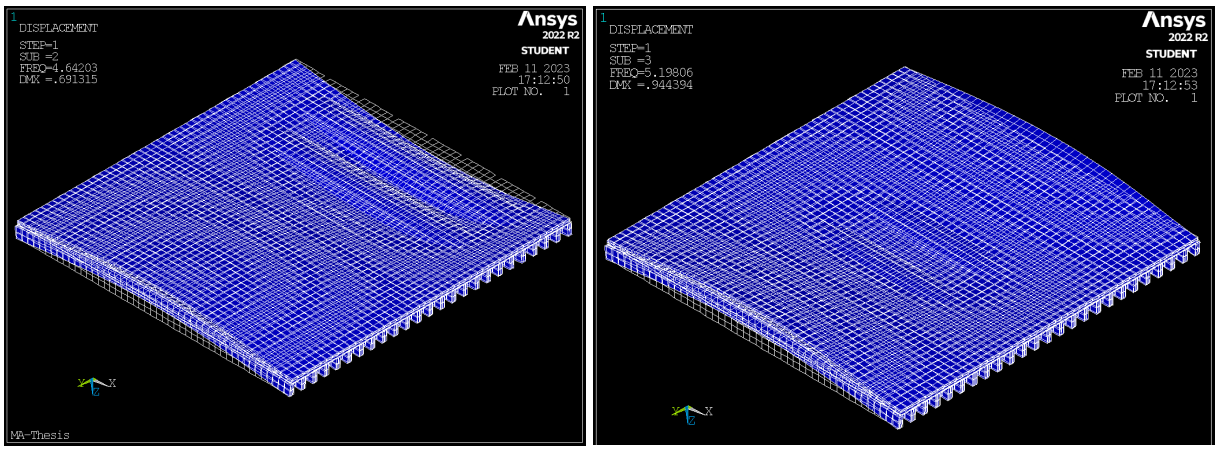


Abbildung 14: Zweite und dritte Eigenform aus FE-Modell, Typ 3b

9. Ergebnisse und Ausblick

Ziel des Forschungsvorhaben ist, ein erweitertes Entwurfskonzept für weitgespannte Holzdecken zu entwickeln. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass weitgespannte Holzdecken trotz ihrer großen Masse zu Schwingungen angeregt werden können. Die subjektive Einschätzung und der neu eingeführte Floor performance level wurden erfasst. Genauere Werte zum Lehr'schen Dämpfungsmaß bei weit gespannten Decken, sowie Erkenntnisse zur modalen Masse konnten gewonnen werden. Die Möglichkeit, abgestimmte Massedämpfer einzubauen, wird weiter untersucht.

10. Danksagung

Das Forschungsprojekt wurde vom 01.01.2021 bis 30.06.2023 an der Hochschule Biberach durchgeführt, in enger Zusammenarbeit mit M.Eng. Philipp Bacher, Dipl.-Ing. Tobias Götz und Dipl.-Ing. Tobias Riehle der PIRMIN JUNG Deutschland GmbH, Remagen. Es wurde vom ZIM finanziert. «ZIM» steht für «Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand» und ist ein Förderprogramm des Bundes für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.

11. Literatur

[1] Hamm, P., Knöpfle, V., Ruf, J.: Schwingungsverhalten von weitgespannten Holzdecken; Versuche am Prüfstand mit 12,5 m x 12,5 m. In: 5. Aachener Holzbautagung 2023. 14. und 15. September 2023. Aachen.
ISBN 978-3-910540-90-3.

[2] Eurocode 5: EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung. Dezember 2010.

[3] Hamm, P., Richter, A., Winter, S.: Floor vibrations – new results. In: WCTE World Conference in Timber Engineering. 20. – 24. Juni 2010. Riva del Garda, Italy.

[4] Eurocode 5: pr EN 1995-1-1:20XX: Design of timber structures – Common rules and rules for buildings – Part 1-1: General. Noch nicht veröffentlicht.

[5] Hamm, P., Marcroft, J., Toratti, T.: Vibrations of floors – Comparison of measured data and suggested design. In: INTER - International Network on Timber Engineering Research. 17. – 19. August 2020, Kap. 53-20-1, 14 S. (http://holz.vaka.kit.edu/540.php), Planned to be held in Chile, because of Covid-19 held as an Online meeting. Editor: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Holzbau und Baukonstruktionen, Karlsruhe.

[6] Bender, M.: Bemessungsdiagramme für Holzbalkendecken bei unterschiedlichen Anforderungen an den Schwingungsnachweis. Masterthesis. Biberach University. 2016.

[7] Ruf, J.: Planung, Aufbau und Durchführung eines Prüfstandes für weitgespannte Holzdecken zur Untersuchung des Schwingungsverhaltens. Masterthesis.
Biberach University of Applied Sciences. 2022.

[8] Kreuzinger, H., Mohr B.: Gebrauchstauglichkeit von Wohnungsdecken aus Holz; Abschlussbericht Januar 1999. TU München, Fachgebiet Holzbau. Forschungsvorhaben durchgeführt für die EGH in der DGfH.

[9] Knöpfle, V.: Planung, FE-Modellierung und Kalibrierung einer weitgespannten Holzbalkendecke mittels Schwingungsmessungen. Masterthesis. Biberach
University of Applied Scienes. 2023.

[10] ISO 10137: Berechnungsgrundlagen für Bauten – Gebrauchstauglichkeit von Gebäuden und Stegen bei Vibrationen. 2007–11.

Aktiv geregelte Schwingungsdämpfer zur Reduzierung der Schwingbeschleunigung

Thomas Hillberger
Arbeitsbereich Holzbau
Universität Innsbruck (UIBK)
Innsbruck, Österreich



Roland Maderebner
Arbeitsbereich Holzbau
Universität Innsbruck (UIBK)
Innsbruck, Österreich



Philipp Dietsch
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Karlsruhe, Deutschland



Aktiv geregelte Schwingungsdämpfer zur Reduzierung der Schwingbeschleunigung

1. Einleitung

Die Gebrauchstauglichkeit von Deckensystemen spielt bei der Bemessung von Tragwerken immer mehr eine wichtige und zusätzlich sehr herausfordernde Rolle. Nicht nur bedingt durch mögliche schlanke Bauteile, sondern auch die realisierbaren Spannweiten und die gestalterischen Freiheiten, welche hinsichtlich der Tragfähigkeit möglich sind, ergibt sich oft, dass die Nachweise der Gebrauchstauglichkeit maßgebend werden. Diese Tatsache ist aber nicht nur im Neubau, sondern auch bei Bestandsbauwerken bekannt, wenn beispielsweise die Masse der Deckensysteme erhöht werden muss, aufgrund einer möglichen Sanierung und der Notwendigkeit, Grenzwerte im Schallschutz einzuhalten.
Bei der aktiven Schwingungsdämpfung liegt ein Themengebiet vor mit sehr viel zusätzlichem Potenzial hinsichtlich der Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit von Deckensystemen. Mitunter zeigt sich das Forschungsinteresse in diesem Themengebiet auch, durch die steigende Anzahl an Publikationen [1, 2]. Der Schwerpunkt dieser Veröffentlichungen liegt jedoch oft bei Stahlbetondecken, welche durch Personen angeregt werden. Diese Konstruktionsweise weist oft eine hohe Eigenmasse auf. Im Gegensatz dazu kann sich der Holzbau dadurch auszeichnen, dass ein geringes Gewicht vorliegt zur verhältnismäßig hohen Festigkeit. Bezogen auf die Tragfähigkeit sind durch gegenwärtige Holzwerkstoffe und Verbindungssysteme Spannweiten realisierbar, welche durchaus mit der Bauweise aus Stahlbeton konkurrieren können [3, 4, 5].
Im folgenden Beitrag liegt der Fokus daher auf der Gebrauchstauglichkeit von Deckensystemen aus Brettsperrholz und im Speziellen werden die personeninduzierten Anregungen thematisiert. Ein zentraler Punkt spielt dabei die Reduzierung der Schwingbeschleunigung von Deckensystemen mithilfe der aktiven Schwingungsdämpfung.

2. Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit

2.1. Allgemeines

Im Bauwesen wird der Tragfähigkeit von Bauwerken höchste Beachtung geschenkt. Im Gegensatz dazu beinhalteten die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit jene Situationen, welche einerseits das Erscheinungsbild, aber auch die Nutzung von Tragwerken beeinträchtigen können. Bezogen auf den Komfort der Menschen wird dies immer mehr zur Herausforderung, weil Teile von Bauwerken hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit immer schlanker gebaut werden können aber sich dadurch auch die Anfälligkeit für personeninduzierte Schwingungen erhöht.

2.2. Stand der Technik

In der aktuellen Fassung des Eurocode 5 [6] ist die Gebrauchstauglichkeit in folgende Bereiche unterteilt: Grenzwerte für Durchbiegungen und das Kapitel der Schwingungen. Auf europäischer Ebene werden Wohnungsdecken in Abhängigkeit zur ersten Eigenfrequenz (größer oder kleiner 8 Hz) differenziert. Im Gegensatz dazu unterscheidet der Nationale Anhang von Österreich [7] beispielsweise für personeninduzierte Schwingungen zwischen drei Deckenklassen. Je nach Deckenklasse gelten unterschiedliche Anforderungen an das Schwingungsverhalten der Bauteile. Die Grenzwerte sind durch Kriterien für die Steifigkeit, die erste Eigenfrequenz und die Schwingbeschleunigung definiert. In Anlehnung an [8] dient Abbildung 1 der Übersicht bzw. der Verwendung dieser Kriterien und enthält die in Österreich normativ geregelten Grenzwerte für Steifigkeit (w_{grenz}), erste Eigenfrequenz (f_{grenz}) und Schwingbeschleunigung (a_{grenz}).

2.3. Problemstellungen bei Deckenschwingungen

Die herausfordernde Thematik der Deckenschwingungen und Gebrauchstauglichkeit wurden bereits in Kapitel 1 erwähnt. Die Grenzwerte der ersten Eigenfrequenz bzw. der folgenden Schwingbeschleunigung können oft nicht eingehalten werden. Der Grenzwert der ersten Eigenfrequenzen wird normativ so gewählt, dass die Frequenzen der ersten harmonischen Anteile der Einwirkung von gehenden Personen weit genug unter dem Grenzwert liegen und dadurch eine Resonanz mit den Deckenschwingungen begrenzt werden kann. Die detaillierte Untersuchung bei nicht erreichtem Frequenzkriterium zielt darauf ab, dass in diesen Bereichen die Beschleunigungen maßgeblich das menschliche Empfinden beeinflusst. Vorhandene Forschungsberichte [9, 10] verweisen dabei auf die «Basiskurven» aus der bereits überarbeiteten Fassung der ISO-2631-2 [11]. In den detaillierten Nachweis fließt die Deckenmasse mit dem Hintergrund, dass die Trägheit des Systems sich positiv auf die Schwingbeschleunigung auswirkt. In diesem Fall nachteilig für den Holzbau, die in anderen Fällen positiv zu bewertende, geringe Eigenmasse.

Damit die Grenzwerte eingehalten werden können, wird im Neubau oft die Deckenstärke erhöht. Diese Option ist aus Sicht der materialeffizienten Nutzung aber auch mit Blick auf Bestandsobjekte nicht immer möglich. Ein weiterer Lösungsansatz bieten dabei passiv schwingungsdämpfende Maßnahmen, welche oft für Brückenkonstruktionen verwendet werden. Der Einsatz dieser Systeme begrenzt sich auf nur wenige Projekte im Hochbau. Aufgrund der notwendigen Abstimmung zum Eigengewicht des Hauptsystems, werden für gesamte Deckenkonstruktionen sehr hohe Tilgungsmassen benötigt. Die Möglichkeit des aktiven Entgegenwirkens erfordert zwar ergänzend eine Kraft, die benötigte zusätzliche Masse reduziert sich dagegen. Ein weiterer Vorteil ist, dass Schwingbeschleunigungen unmittelbar während der Erregung reduziert werden.

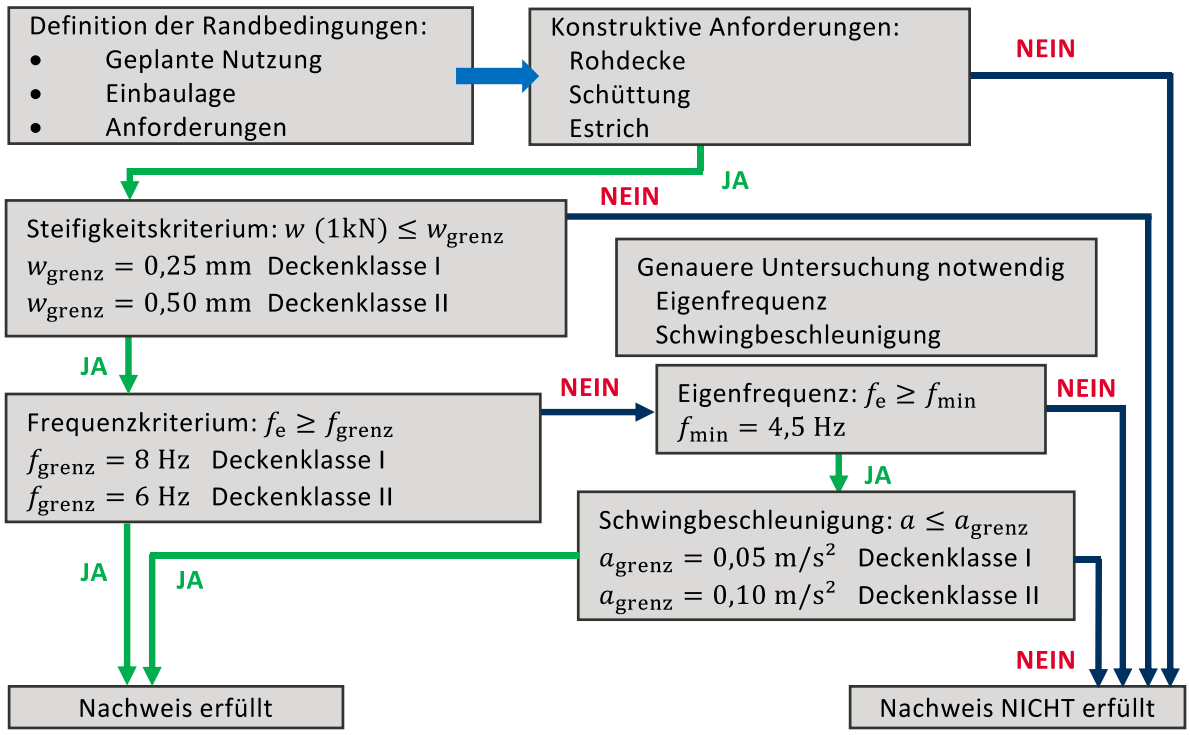


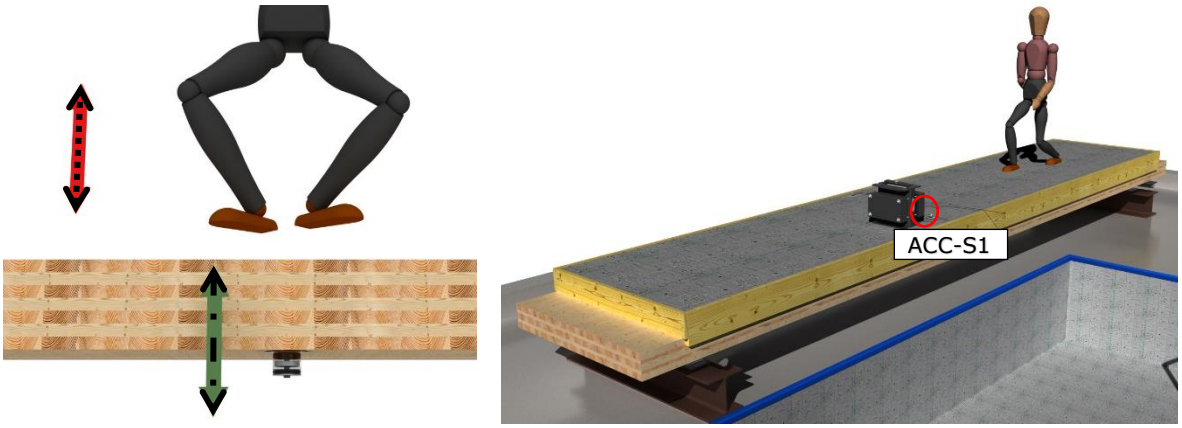
Abbildung 1: Übersicht Nachweisführung für Schwingungen von Wohnungsdecken und Grenzwerte lt. Nationalem Anwendungsdokument (NAD) in Österreich [7]

3. Prinzip der aktiven Schwingungsreduktion

Im Gegensatz zu passiven Tilgungsmaßnahmen mit Zwei- oder Mehrmassenschwingern wird bei aktiven Elementen das System neben der personeninduzierten Erregung mit Hilfe einer zusätzlichen Kraft angeregt und durch das Entgegenwirken gedämpft. Eine positive Beeinflussung der dynamischen Eigenschaften kann erreicht werden, indem das aktive Schwingungselement die Beschleunigung direkt während des Bewegungsablaufes der Person reduziert.
Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, aktiv auf Schwingungen zu reagieren. Beispiele von Regelsystemen für den Hochbau wurden bereits für die Beschleunigungs- [1] und Geschwindigkeitsrückkopplung [12] untersucht. Grundsatz für die Regelung sind im Allgemeinen die gemessenen Beschleunigungswerte, mit Hilfe derer die Reaktion des aktiven Elements bestimmt wird. Die vorliegende Schwingbeschleunigung der Decke wird durch den entgegenwirkenden Impuls reduziert. Prinzipiell basiert das Schwingungsverhalten mit aktiver Regelung auf einem System bestehend aus zwei Kraftkomponenten: Einerseits die erregende Person $F_P(t)$ und andererseits jener des Schwingungselements $F_{ASE}(t)$. Gleichung (1) beschreibt den dynamischen Zusammenhang zwischen Erregung und schwingendem System mit M, C und K als Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrix.

$$M \cdot \ddot{x}(t) + C \cdot \dot{x}(t) + K \cdot x(t) = F_{\mathrm{P}}(t) + F_{\mathrm{ASE}}(t) \quad (1)$$

Durch die Auswertung der Beschleunigungswerte und Berechnung des Spannungssignals, kann der aktive Impuls das Hauptsystem positiv beeinflussen. Das Prinzip des Entgegenwirkens ist in Abbildung 2a dargestellt. Dabei muss das aktive Element nicht zwingendermaßen unterhalb der Decke platziert werden. Denkbar ist ebenfalls die Integration in den Fußbodenaufbau. Weiters soll Abbildung 2b verdeutlichen, wo der maßgebende Beschleunigungssensor (ACC-S1) für die folgenden Messungen positioniert ist.



(a) Prinzip aktive Schwingungsreduktion (b) Versuchsaufbau: Messungen Rohdecke

Abbildung 2: Prinzip des aktiven Entgegenwirkens bei personeninduzierten Schwingungen [13]

4. Experimentelle Untersuchungen

4.1. Allgemeines

Die durchgeführten Messungen dienen der Veranschaulichung inwieweit das aktive Entgegenwirken beim Versuchsaufbau eine positive Wirkung zeigt. Für die Auswertungen und Vergleiche zwischen Referenzobjekt und Versuchsaufbau mit aktiv beeinflussten Schwingungseigenschaften wird sich der Darstellungsmöglichkeit des Spektrogramms und der short-time Fourier-Transformation (kurz STFT) bedient. Mit dieser Auswertungsvariante ist es auch möglich, die willkürlich umhergehende Person auf der Decke zu erfassen und gleichzeitig Vergleiche zwischen aktiver Regelung und Referenzmessung herzustellen (Abbildung 7).

Eine weitere Möglichkeit der Datenanalyse für den Vergleich unterschiedlicher Messungen ist die Ermittlung des Effektivwerts der Beschleunigung (a_{RMS}). Gemäß Gleichung (2) wird a_{RMS} durch die Beschleunigungswerte $a(t)$ über eine Zeitspanne T ermittelt, wobei T_1 und T_2 der Anfangs- und Endzeit entsprechen ($T = T_2 - T_1$). Für die Auswertung wird eine übliche Schrittfolge bei einer Gehfrequenz von 2 Hz verwendet und damit ergibt sich lt. Nationalem Anhang [7] eine Zeitspanne von 1 s. Für die Messungen mit den ON- bzw. OFF-Perioden werden die Werte über die gesamte Periode von 20 s gemittelt (siehe Abbildung 5).

$$a_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left(\int_{T_1}^{T_2} (a(t)^2 \cdot dt) \right)} \tag{2}$$

4.2. Versuchsstand

Der Versuchsstand entspricht einer Brettsperrholzplatte mit Fußbodenaufbau aus Schüttung, Trittschalldämmung und Estrich. Vor den dynamischen Versuchen werden die Steifigkeitskennwerte der Brettsperrholzplatte und des Estrichs bestimmt. Die Brettsperrholzplatte wird beidseitig gelenkig auf Stahlrollen gelagert. Damit liegt eine einachsig gespannte Deckenkonstruktion vor. Der Auflagerabstand bei den angeführten Versuchen beträgt dabei 5,8 m. In Tabelle 1 sind die einzelnen Schichten des Fußbodenaufbaus angeführt. Für das aktive Entgegenwirken werden piezoelektrische Beschleunigungssensoren und ein Schwingungserreger vom Typ APS 400 verwendet. Der Versuchsaufbau sowie eine Aufnahme während der experimentellen Untersuchungen mit dem aktiven Entgegenwirken sind in Abbildung 3 dargestellt.

Tabelle 1: Versuchsobjekt Fußbodenaufbau

Schicht	**Ergänzung**	**Länge** [mm]	**Breite** [mm]	**Höhe** [mm]
Brettsperrholzplatte	5 Schichten – 40/20/40/20/40	7000	1222	160
Schüttung	ungebunden	6000	1222	60
Trittschalldämmung		6000	1222	30
Nassestrich		6000	1222	70



(a) Versuchsstand mit Fußbodenaufbau (b) Versuche mit aktivem Element

Abbildung 3: Experimentelle Untersuchungen am Fußbodenaufbau

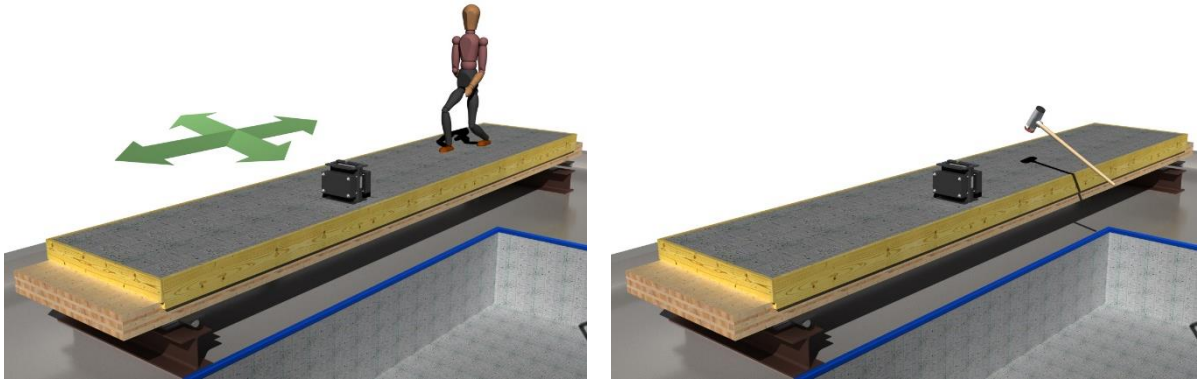
4.3. Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung kann unterteilt werden in personeninduzierte Anregungen (Gehen und Heel-Drop) und Anregungsarten durch weitere Hilfsmittel (Impulshammer und Shaker). Im folgenden Abschnitt liegt der Fokus auf den Versuchen mit Schwingungserregung durch Personen, da diese für die Praxis relevant sind. Weiters werden Messungen mit dem schweren Impulshammer IH50 für Anregungen im Bauwesen dargestellt, welche essentiell sind für die Bewertung der Funktionsweise des aktiven Entgegenwirkens, weil die Erregerkraft ebenfalls dokumentiert werden kann. Reproduzierbare bzw. Vergleichbare

Anregungen sind sehr gut möglich durch die anschließende Überprüfung der aufgebrachten Krafterregung. Die Aufnahme der Beschleunigungen erfolgt über Sensoren im Bereich des Shakers. Weiters werden Beschleunigungen direkt am aktiven Element gemessen, um Rückschlüsse auf die dynamische Kraftkomponente ziehen zu können, welche zur Reduktion der Schwingbeschleunigung notwendig ist.
Es werden jeweils ON- und OFF-Perioden definiert, welche sich auf die Messungen mit und ohne aktiver Schwingungsreduzierung beziehen. Eine Periode ist mit 20 s definiert. Es gibt zwei OFF Perioden, welche unterbrochen werden von einer ON-Periode, bei der das aktive Element zugeschaltet wird. Es ergibt sich dadurch eine gesamte Versuchslänge von 60 s.
Die Eigenfrequenzen und weitere Parameter werden in Anlehnung an [14] bestimmt. Für den Vergleich der Effektivwerte der Beschleunigungen (a_{RMS}) werden die ungewichteten Messwerte verwendet.

4.4. Messergebnisse

Die dargestellten Messergebnisse beziehen sich auf die Werte des Beschleunigungssensors ACC-S1 und unterscheiden sich hinsichtlich der Referenzmessung (REF) und der aktiven Schwingungsreduktion (AVC). Die Beschleunigungsmessung wird durchgehend am gleichen Sensor aufgezeichnet und ist in Abbildung 5 unterschiedlich eingefärbt dargestellt. Ersichtlich ist, wie während der ON-Periode der gemittelte Effektivwert der Beschleunigung im Vergleich zu den Referenzmessungen auf 59 % bzw. 53 % reduziert werden kann.



(a) Belastungsart: zufällig umhergehende Person (b) Belastungsart: Impulshammerschläge

Abbildung 4: Versuchsdurchführung mit aktivem Entgegenwirken [13]

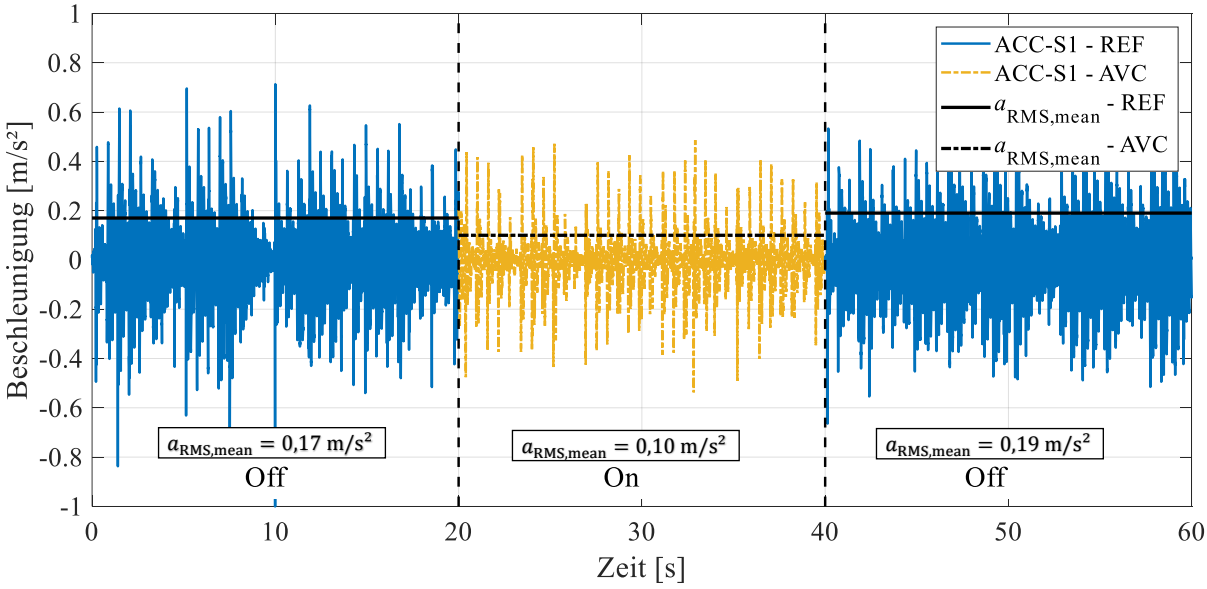
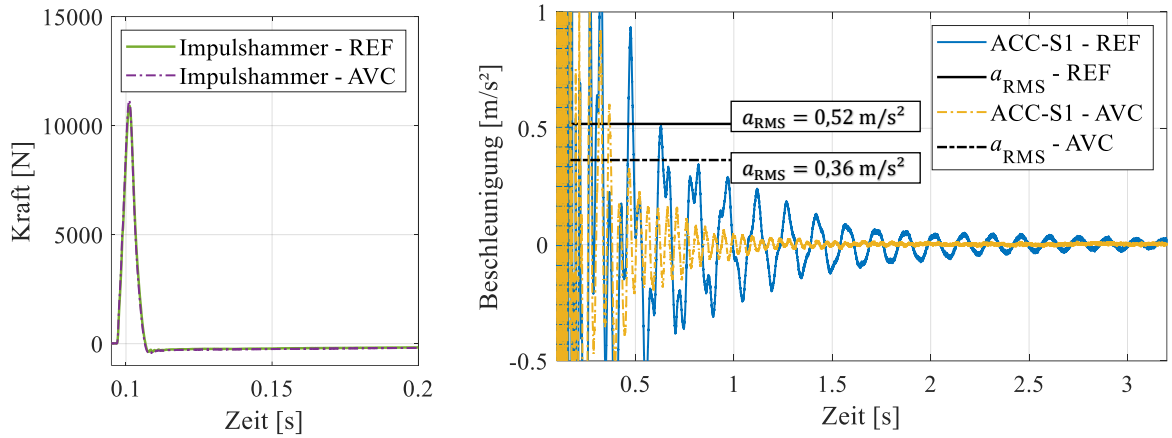


Abbildung 5: Versuchsergebnisse Beschleunigungs-Zeit-Verlauf mit (AVC) und ohne aktive Dämpfung (REF)

Bei den Impulshammerschlägen lassen sich auch einzelne Schläge miteinander vergleichen. Die Messung der Kraftkomponente des Impulshammers ermöglicht die Vergleiche von zwei Erregungen mit gleicher Intensität. In Abbildung 6 ist die Reduktion durch die

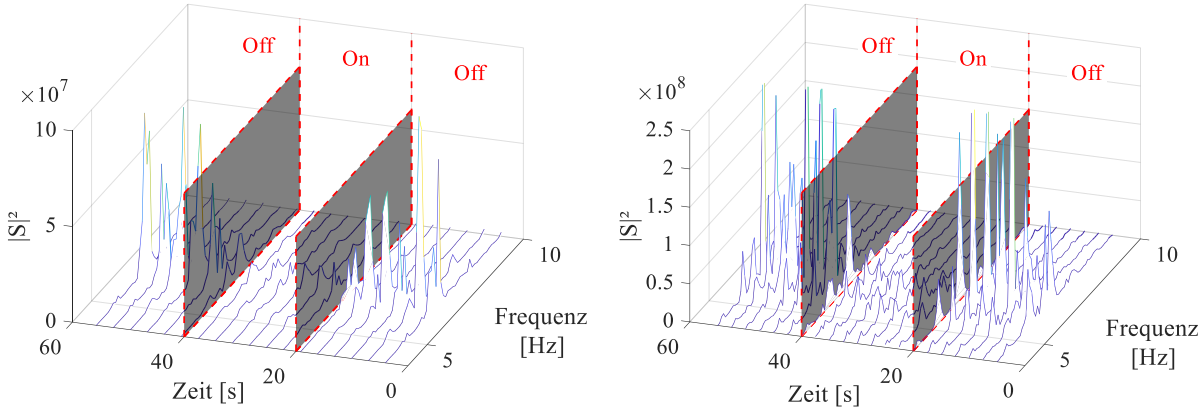
aktive Schwingungsdämpfung ersichtlich. Das aktive Element ermöglicht eine Verringerung von a_{RMS} bezogen auf die erste Sekunde nach der Erregung auf 69 %. Im weiteren Verlauf ist der prozentuale Wert sogar noch geringer. a_{RMS} gerechnet für die Zeitspanne zwischen 0,3 s und 1,3 s beträgt nur mehr 42 % von der Referenzmessung.

Die Reduktion der Schwingbeschleunigung zeigt sich auch in der graphischen Darstellung der STFT. Im Bereich zwischen 20 s und 40 s sind die Auswirkungen der ersten Eigenfrequenz bezogen auf das Schwingungsverhalten des Deckenaufbaus nur mehr sehr gering im Vergleich zu den beiden anderen Perioden. Ergänzend zu den Gehversuchen (Abbildung 7a) wird der Versuchsaufbau ebenfalls durch mehrere Impulshammerschläge angeregt (Abbildung 7b). Die positive Beeinflussung des Schwingungsverhaltens ist wiederum deutlich ersichtlich im Bereich der ersten Eigenfrequenz von ca. 6,5 Hz.



(a) Kraft-Zeit-Verlauf – Impulshammer (b) Beschleunigungs-Zeit-Verlauf – Deckenelement

Abbildung 6: Anregung durch Impulshammerschlag mit und ohne Entgegenwirken



(a) STFT zufolge personeninduzierter Belastung (b) STFT zufolge Impulshammerschlägen

Abbildung 7: Ergebnisse der Kurzzeit-Fourier-Transformation mit aktivem Entgegenwirken

5. Diskussion und Ausblick

Die Auswertungen der Versuchsdaten zeigen, dass die aktive Schwingungsreduzierung ein Themengebiet mit großem Potential in Bezug auf die positive Beeinflussung der Schwingungseigenschaften von Deckenelementen ist. Weitere Untersuchungen mit optimierter Regelungstechnik und Aktoren sind im Zuge des Forschungsprojektes geplant und wurden teilweise auch schon realisiert.

Ein zusätzlich wichtiger Punkt bei der Bewertung der Gebrauchstauglichkeit sind neben der Messung und Wahrnehmung auch die Berechnungsmodelle. Wie bereits in [15] präsentiert, liegen schon erste Ansätze vor, die aktiven Schwingungselemente in FE-Simulation zu integrieren. In erster Linie wurde dabei der Versuchsaufbau modelliert. Die Vergleiche zwischen Messung und Berechnung zeigen eine sehr gute Übereinstimmung des Schwingungsverhaltens und auch die Belastungsarten durch Personen liefern qualitativ vergleichbare Werte.

Wichtig sind weitere Untersuchungen sowohl in experimenteller Sicht am gesamten Fußbodenaufbau, als auch bei den Simulationsmodellen, vor allem der Modellierung von Estrich, Trittschalldämmung und Schüttung. Ziel ist es, die Verbesserung mittels aktiver Schwingungsreduzierung über die integrierten Modelle realitätsgetreu abzubilden. Durch die Überprüfung an vorhandenen Projekten wäre es möglich, die aktiven Systeme im Neubau schon vorab einzuplanen. Die aktiven Elemente können in der «genaueren Untersuchung» (siehe Abbildung 1) für Decken mit einer ersten Eigenfrequenz $f_{min} \leq f_1 < f_{grenz}$ berücksichtigt werden. Nachweise der Durchbiegungen werden nur durch das geringe Eigengewicht der Elemente beeinflusst, jedoch kann die Schwingbeschleunigung deutlich reduziert werden.

6. Danksagung

Inhalte dieses Beitrags entstanden im Zuge des Promotionsvorhabens des Hauptautors und dafür möchte er sich bei Assoz.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Furtmüller bedanken.
Weiters gilt ein Dank den Partnern des Forschungsprojektes «Good Vibrations» – der Forschungsförderungsgesellschaft Österreich (FFG – Projekt Nummer: F0999891097 – B1: Aktive Systeme zur Schwingungsdämpfung von Holzdecken), dem Team der Technischen Versuchs- und Forschungsanstalt (TVFA) und der Firma SIHGA GmbH aus Ohlsdorf, Österreich.

7. Literatur

[1] Díaz I. M., Reynolds P.; Acceleration feedback control of human-induced floor vibrations. In: Engineering Structures 32, 163–173, 2010.

[2] Nyawako D., Reynolds P.; Response-dependent velocity feedback control for mitigation of human-induced floor vibrations. In: Smart Materials and Structures 18, 075002, 2009.

[3] Arnold M., Schenk M., Kainz N., Dietsch P., Cabrero J. M., Maderebner R., Winter S.; Schlussbericht zum Europäischen Forschungsvorhaben InnoCrossLam–Innovative Lösungen für das zukünftige Bauen mit Brettsperrholz. Technische Universität München, Arbeitspakete 4 und 5, 2022.

[4] Maurer B., Maderebner R.; Cross laminated timber under concentrated compression-loads-methods of reinforcement. In: Engineering Structures 245, 112534, 2021.

[5] Stieb T., Maurer B., Bestler M., Dietsch P., Maderebner R.; Solutions for edge connections to build two-way spanning cross laminated timber slabs. In: WCTE – World Conference on Timber Engineering, 2023.

[6] EN 1995-1-1:2004; Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, + AC (2006) + A1 (2008) + A2 (2014). CEN European committee for standardization, Brüssel, Belgien.

[7] ÖNORM B 1995-1-1:2023-08, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau – Nationale Festlegungen zur Umsetzung der ÖNORM EN 1995-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen. ASI Austrian Standards International, Wien.

[8] Hamm, P.; Richter, A.; Bemessungs- und Konstruktionsregeln zum Schwingungsnachweis von Holzdecken. Fachtagung Holzbau, Leinfelden-Echterdingen. Hrsg.: Landesbeirat Holz Baden-Württemberg e.V., Stuttgart. S. 15-29, 2009.

[9] Kreuzinger, H.; Mohr, B.: Gebrauchstauglichkeit von Wohnungsdecken aus Holz. Schlussbericht, TU München, Fachgebiet Holzbau, Forschungsvorhaben durchgeführt für die EGH in der DGfH, 1999.

[10] Winter, S.; Hamm, P.; Richter, A.: Schwingungs- und Dämpfungsverhalten von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken. Schlussbericht, TU München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Forschungsvorhaben gefördert aus den Haushaltsmitteln des BMWA über die AiF, 2010.

[11] ISO 2631-2:1989; Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz). Genf, Schweiz International Organization for Standardization.

[12] Nyawako D., Reynolds P.; Response-dependent velocity feedback control for mitigation of human-induced floor vibrations. Smart Mater, Struct, 18 (7), 2009.

[13] Hillberger T.; Schwingungsreduzierung bei Flachdecken aus Brettsperrholz (Arbeitstitel). Dissertation, Universität Innsbruck, Manuskript in Arbeit, Stand März 2024.

[14] EN 16929:2018-12; Test methods – Timber floors – Determination of vibration properties. CEN European committee for standardization, Brüssel, Belgien.

[15] Hillberger T., Maderebner R., Dietsch P.; Aktive Schwingungsdämpfung für Brettsperrholzdecken – Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Untersuchungen. In: 10. Doktorandenkolloquium Holzbau Forschung + Praxis, Stuttgart, 2024.

BRAND
Umgang mit dem Brandverhalten von Holz

Zuordnungstabellen für das Brandverhalten von Baustoffen im DACH Raum – Folgen für den Holzbau

Hanno Werning
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Zuordnungstabellen für das Brandverhalten von Baustoffen im DACH Raum – Folgen für den Holzbau

Bauordnungsrechtliche Vorschriften stellen weltweit Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen in Bauwerken. Diese Anforderungen werden in unterschiedlicher Form gestellt, z.B. verbal mit Begriffen oder mit speziellen Bezeichnungen für die bauaufsichtlichen Anforderungen. Dem gegenüber stehen Leistungsangaben für das Brandverhalten von Baustoffen in Form von Klassen des Brandverhaltens nach verschiedenen nationalen und/oder europäischen Klassifizierungsnormen, z.B. EN 13501-1 [1]. Um diese beiden unterschiedlichen «Sprachen» für Brandverhalten miteinander vergleichen zu können, müssen sie ineinander «übersetzt» werden. Dies geschieht durch die sogenannten Zuordnungstabellen.

Vorbemerkung: Der Beitrag orientiert sich für Deutschland am Muster-Bauordnungsrecht, für Österreich an den OIB-Richtlinien und für die Schweiz an den VKF-Richtlinien. Es können Bundesland- bzw. Kanton-spezifische Unterschiede bestehen sowie projektspezifische Festlegungen gelten. Maßgebend sind jeweils die regionalen bauordnungsrechtlichen Vorschriften, in Deutschland z.B. die Landesbauordnungen und ggf. projektspezifische genehmigte Brandschutzkonzepte, die von den hier dargestellten Regelungen abweichen können.

1. Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen

1.1. Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen in D

Die grundsätzliche Unterscheidung der Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen wird in § 26 Abs. 1 MBO [2] festgelegt. Es werden **nichtbrennbare**, **schwerentflammbare** und **normalentflammbare** Baustoffe unterschieden. Baustoffe, die nicht mindestens normalentflammbar sind, werden als **leichtentflammbar** bezeichnet. Diese dürfen in Deutschland nicht verwendet werden, es sei denn sie werden in Verbindung mit anderen Baustoffen verwendet und sind in dieser Verbindung nicht mehr leichtentflammbar. Grundsätzlich gilt damit gemäß § 26 Abs. 1 MBO, das alle Bauprodukte mindestens normalentflammbar sein müssen. Die Anforderungen können kombiniert sein mit der Forderung, dass die Baustoffe **nicht brennend abfallen oder abtropfen** dürfen (z.B. § 28 Abs. 3 MBO) oder dass sie eine **geringe Rauchentwicklung** haben müssen. Parallel zu den Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen werden stellenweise Anforderungen an einen **Schmelzpunkt von mindestens 1000°C** für Mineralwolle-Dämmstoffe nach DIN 4102-17 [3] oder eine **Mindest-Rohdichte** von Baustoffen gestellt, die in Verbindung mit den Anforderungen an das Brandverhalten gesehen werden.

Beispiele für bauordnungsrechtliche Anforderungen allgemein und speziell im Holzbau sind:
- Bauteile, die feuerbeständig sein müssen, müssen tragende und aussteifende Teile aus nichtbrennbaren Baustoffen haben und bei raumabschließenden Bauteilen zusätzlich eine in Bauteilebene durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen haben (§ 26 Abs. 2 Sätze 1 bis 3 MBO).
- Wenn Bauteile, die hochfeuerhemmend sein müssen, tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen haben, müssen sie allseitig eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen haben; sofern Bauteile, die hochfeuerhemmend sein müssen, tragende und aussteifende Teile aus nichtbrennbaren Baustoffen haben, bestehen keine solchen Anforderungen an die Brandschutzbekleidung und die Dämmstoffe – raumabschließende Bauteile müssen jedoch eine in Bauteilebene durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen haben (§ 26 Abs. 2 Sätze 1 bis 3 MBO).

- Bauteile, die feuerhemmend sein müssen, dürfen (vollständig) aus normalentflammbaren Baustoffen bestehen (§ 26 Abs. 2 Sätze 1 bis 3 MBO).
- In notwendigen Treppenräumen und in notwendigen Fluren müssen Wände und Decken aus brennbaren Baustoffen eine Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen in ausreichender Dicke haben (§ 35 Abs. 5 Nr. 2 und § 36 Abs. 6 Nr. 2 MBO); MVV TB A 2.1.12 [4] konkretisiert dies derart, dass diese Anforderung z.B. mit einer 12,5 mm dicken Gipsplatte erfüllt wird.
- Dämmstoffe in hochfeuerhemmenden Bauteilen in Holzrahmen- und Holztafelbauweise für Gebäude der Gebäudeklasse 4 müssen nichtbrennbar sein und einen Schmelzpunkt ≥ 1000°C entsprechend DIN 4102-17 aufweisen (MHolzBauRL 2020-10 [5]).
- Mit nichtbrennbaren Gipsfaserplatten mit einer Mindestrohdichte von 1000 kg/m³ nach europäisch technischer Bewertung mit jeweils bestimmter Dicke und Befestigung gilt die Anforderung nach Verhinderung der Entzündung tragender und aussteifender Bauteile aus Holz oder Holzwerkstoffen nach MHolzBauRL 2020-10 Abschnitte 4.2 und 5.2 als erfüllt.

1.2. Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen in A

In Österreich wird eine Harmonisierung der bautechnischen (in Deutschland: «bauaufsichtlichen») Vorschriften angestrebt. Dazu dienen die OIB-Richtlinien, welche die Bundesländer in ihren Landesbauordnungen in Bezug nehmen können. Konkrete bautechnische Anforderungen werden somit aus den Bauordnungen heraus in die OIB-Richtlinien verlagert. Stellenweise existieren jedoch auch noch Vorgaben in den Bauordnungen.

In der OIB-Richtlinie 2 «Brandschutz» [6] werden die Anforderungen allerdings nicht verbal formuliert, sondern es werden **Klassen des Brandverhaltens** verwendet. Die Erläuterungen zur OIB-Richtlinie 2 [7] geben dazu an: «*Aufgrund der europäischen Normung werden die europäischen Begriffe und Klassen im Bereich des Brandschutzes verwendet. Dabei wird den Klassifizierungen die ÖNORM-Serie **EN 13501** «Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten» zugrunde gelegt.*»

Beispiele für bauordnungsrechtliche Anforderungen allgemein und speziell im Holzbau sind:

- «*Die in Fluchtwegen verwendeten Baustoffe, wie z.B. Fußbodenbeläge, Wand- und Deckenverkleidungen, müssen so ausgeführt sein, dass bei einem Brand das sichere Verlassen des Bauwerkes nicht durch Feuer, Rauch oder brennendes Abtropfen beeinträchtigt wird*» (§ 95 Abs. 3 Bauordnung für Wien [8]).
- Bauteile, an die in der OIB-Richtlinie 2 Anforderungen an die Feuerwiderstandsklasse in Verbindung mit Anforderungen an Baustoffe der Klasse A2 gestellt werden, müssen nicht vollständig aus Baustoffen der Klasse A2 bestehen; es genügt, wenn die für die Tragfähigkeit wesentlichen Bestandteile der Bauteile der Klasse A2 entsprechen, die sonstigen Bestandteile müssen aus Baustoffen mindestens der Klasse B bestehen (OIB-Richtlinie 2 Brandschutz Abschnitt 0 Vorbemerkungen [6]).
- Detaillierte Anforderungen an Bestandteile bestimmter Bauteile sind in Tabelle 1a der OIB-Richtlinie 2 angegeben (Abbildung 1). Die Klasse F nach EN 13501-1 kommt in diesen Tabellen nicht vor, es gibt jedoch Tabellenzellen mit dem Eintrag «–». Es bleibt unklar, ob hier Baustoffe der Klasse F verwendet werden dürfen.
- Mit Blick auf den Holzbau sind die kombinierten Anforderungen aus Tabelle 1b der OIB-Richtlinie 2 relevant (weitere Anforderungen können sich aus anderen Tabellen ergeben, z.B. für Rettungswege und Sonderbauten). Solange darin die geforderte Feuerwiderstandsklasse nicht mit der Anforderung A2 kombiniert ist, dürfen die tragenden Teile der Bauteile aus Holz bestehen; dies gilt z.B. bis einschließlich Gebäudeklasse 5 mit höchstens 6 oberirdischen Geschossen für tragende, nicht brandabschnittsbildende Bauteile in oberirdischen Geschossen (außer dem obersten Geschoss) sowie für brandabschnittsbildende Decken und brandabschnittsbildende Wände, die sich nicht an der Nachbargrundstücks- bzw. Bauplatzgrenze befinden, (Abbildung 2; genannte Beispiele in Zeile 1.2 und Zeile 3.2). Es können sich Anforderungen an einzelne Teile der Bauteile aus der zuvor erwähnten Tabelle 1a der OIB-Richtlinie 2 ergeben (in diesem Beitrag Abbildung 1)

Tabelle 1a: Allgemeine Anforderungen an das Brandverhalten

Gebäudeklassen (GK)		GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5	
						≤ 6 oberirdische Geschoße	> 6 oberirdische Geschoße
1	**Fassaden**						
1.1	Außenwand-Wärmedämmverbundsysteme	E	D	D	C-d1	C-d1	C-d1
1.2	Fassadensysteme, vorgehängte hinterlüftete, belüftete oder nicht hinterlüftete						
1.2.1	Gesamtsystem *oder*	E	D-d1	D-d1	B-d1 (1)	B-d1 (1)	B-d1
1.2.2	Einzelkomponenten						
	- Außenschicht	E	D	D	A2-d1 (2)	A2-d1 (2)	A2-d1 (3)
	- Unterkonstruktion stabförmig / punktförmig	E / E	D / D	D / A2	D / A2	D / A2	C / A2
	- Dämmschicht bzw. Wärmedämmung	E	D	D	B (2)	B (2)	B (3)
1.3	Vorhangfassaden - Einzelkomponenten						
	- Profil (Rahmen, Pfosten oder Riegel)	E	D	D	D	D (12)	A2
	- Ausfachung als Verglasung	E	D	D	C-d2	B-d1	B-d1
	- Ausfachung als Paneel	E	D	D	A2-d1 (12,13)	A2-d1 (12,13)	A2-d1
	- Abdichtung zwischen Ausfachung und Profil	E	E	E	E	E	E
	- Beschichtung (sofern nicht mit Profil oder Ausfachung mitgeprüft)	E	D	D	D	B	B
1.4	Sonstige Außenwandbekleidungen oder –beläge sowie nichttragende Außenbauteile	E	D-d1	D-d1	B-d1 (4)	B-d1 (4)	B-d1
1.5	Gebäudetrennfugenmaterial	E	E	E	A2	A2	A2
1.6	Geländerfüllungen bei Balkonen, Loggien u. dgl.	-	-	-	B (4)	B (4)	B

[...]

3	**Treppenhäuser**						
3.1	Wandbekleidungen (5)						
3.1.1	Gesamtsystem *oder*	-	D	C	B	A2	A2
3.1.2	Einzelkomponenten						
	- Außenschicht	-	D	C (4)	B	A2	A2
	- Unterkonstruktion	-	D	A2 (4)	A2 (4)	A2 (4)	A2 (4)
	- Dämmschicht bzw. Wärmedämmung	-	C	C	A2	A2	A2
3.2	abgehängte Decken	-	D-s1, d0	C-s1, d0	B-s1, d0	A2-s1, d0	A2-s1, d0
3.3	Wand- und Deckenbeläge	-	D-s1, d0	C-s1, d0	B-s1,d0	A2-s1, d0	A2-s1, d0
3.4	Bodenbeläge						
3.4.1	in Treppenhäusern gemäß Tabelle 2a, 2b	-	D_{fl}-s1	C_{fl}-s1	B_{fl}-s1	$A2_{fl}$-s1	$A2_{fl}$-s1
3.4.2	in Treppenhäusern gemäß Tabelle 3	-	D_{fl}-s1	C_{fl}-s1 (6)	C_{fl}-s1	B_{fl}-s1	$A2_{fl}$-s1
3.5	Dämmstoffe von Leitungen	-	D-s1, d0	C-s1, d0	B-s1, d0	A2-s1, d0	A2-s1, d0

Abbildung 1: Auszüge aus Tabelle 1a der OIB-Richtlinie 2 [6]

– Es ist bemerkenswert, dass in der OIB-Richtlinie 2 die Brandnebenerscheinungen Rauchentwicklung (im Klassifizierungssystem von EN 13501-1 [1] beschrieben durch s1, s2 und s3) sowie brennendes Abtropfen oder Abfallen (im Klassifizierungssystem von EN 13501-1 beschrieben durch d0, d1 und d2) nicht regelmäßig in Bezug genommen werden. Wenn nur A2 gefordert wird, ist auch A2 – s3,d2 zulässig. An einigen Stellen wird jedoch auch A2 – s1,d0 gefordert (z.B. Tabelle 1a Zeilen 3.2, 3.3 und 3.5 für abgehängte Decken, Wand- und Deckenbeläge sowie Dämmstoffe von Leitungen in Treppenhäusern der Gebäudeklasse 5). Wenn (nur) die Klasse E gefordert wird, ohne Zusatzangabe der Brandnebenerscheinung, bleibt unklar, ob (wie bei anderen Anforderungen, bei denen nur die grundlegende Klasse angegeben ist) die Brandnebenerscheinung d irrelevant ist, mithin also auch E – d2 verwendet werden darf, oder ob ein «echtes» E (also ohne d2) verwendet werden muss (vgl. Abschnitt 2 in diesem Beitrag).

Tabelle 1b: Allgemeine Anforderungen an den Feuerwiderstand von Bauteilen

Gebäudeklassen (GK)		GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5	
						≤ 6 oberirdische Geschoße	> 6 oberirdische Geschoße
1 tragende Bauteile (ausgenommen Decken und brandabschnittsbildende Wände)							
1.1	im obersten Geschoß	-	R 30	R 30	R 30	R 60 (5)	R 60
1.2	in sonstigen oberirdischen Geschoßen	R 30 (1)	R 30	R 60	R 60	R 90	R 90 und A2
1.3	in unterirdischen Geschoßen	R 60	R 60	R 90 und A2	R 90 und A2	R 90 und A2	R 90 und A2
2 Trennwände (ausgenommen Wände von Treppenhäusern)							
2.1	im obersten Geschoß	-	REI 30 EI 30	REI 30 EI 30	REI 60 EI 60	REI 60 (5) EI 60	REI 60 EI 60
2.2	in oberirdischen Geschoßen	-	REI 30 EI 30	REI 60 EI 60	REI 60 EI 60	REI 90 EI 90	REI 90 und A2 EI 90 und A2
2.3	in unterirdischen Geschoßen	-	REI 60 EI 60	REI 90 und A2 EI 90 und A2	REI 90 und A2 EI 90 und A2	REI 90 und A2 EI 90 und A2	REI 90 und A2 EI 90 und A2
2.4	zwischen Wohnungen bzw. Betriebseinheiten in Reihenhäusern	nicht zutreffend	REI 60 EI 60	nicht zutreffend	REI 60 EI 60	nicht zutreffend	nicht zutreffend
3 brandabschnittsbildende Wände und Decken							
3.1	brandabschnittsbildende Wände an der Nachbargrundstücks- bzw. Bauplatzgrenze	REI 60 EI 60	REI 90 (2) EI 90 (2)	REI 90 und A2 EI 90 und A2	REI 90 und A2 EI 90 und A2	REI 90 und A2 EI 90 und A2	REI 90 und A2 EI 90 und A2
3.2	sonstige brandabschnittsbildende Wände oder Decken	nicht zutreffend	REI 90 EI 90	REI 90 EI 90	REI 90 EI 90	REI 90 EI 90	REI 90 und A2 EI 90 und A2

Abbildung 2: Auszug aus Tabelle 1b der OIB-Richtlinie 2 [6]

1.3. Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen in CH

Die VKF-Brandschutznorm [9] und die mit ihr verbundenen VKF-Brandschutzrichtlinien (z.B. [10], [11]; zusammen: VKF-Brandschutzvorschriften) nutzen für Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen die Bezeichnungen **RF1** (kein Brandbeitrag), **RF2** (geringer Brandbeitrag), **RF3** (zulässiger Brandbeitrag) und **RF4** (unzulässiger Brandbeitrag). «RF» basiert darin auf französisch «reaction au feu». Zusätzlich werden Baustoffe mit kritischem Verhalten unterschieden und mit der Abkürzung **cr** bezeichnet (französisch «comportement critique»); cr-Baustoffe sind solche Baustoffe, die aufgrund ihrer Rauchentwicklung und/oder aufgrund von brennendem Abtropfen/Abfallen und/oder aufgrund von Korrosivität (i.d.R. der Verbrennungsprodukte) im Brandfall zu nicht akzeptierten Brandauswirkungen führen können [11], sie dürfen nur eingeschränkt verwendet werden. Schon die VKF-Brandschutznorm nimmt in Art. 24 für Baustoffe ausdrücklich auch Bezug auf die Rauchentwicklung, bezeichnet als «Qualmverhalten»: «*Massgebende Kriterien sind insbesondere Brand- und Qualmverhalten, brennendes Abtropfen und Korrosivität*.» [9]. Die Verwendung (in CH: Anwendung) von cr-Baustoffen ist jedoch nicht grundsätzlich untersagt. Nach VKF Brandschutzrichtlinie Verwendung von Baustoffen, 14-15de, Abschnitt 2 Abs. 4 gilt: «*Baustoffe der RF4 (cr) dürfen nur eingesetzt werden, wenn diese hohlraumfrei und allseitig K 30 gekapselt eingebaut werden.*» (Zu Ausnahmen vgl. [10].)

Beispiele für bauordnungsrechtliche Anforderungen allgemein und speziell im Holzbau sind:

- «*Baustoffe mit einem kritischen Verhalten (cr gemäss Zuordnungstabellen in der Brandschutzrichtlinie «Baustoffe und Bauteile») sind im Innern von Bauten und Anlagen raumseitig nicht ohne vollflächige Abdeckung anwendbar. Dabei beträgt die minimale Materialstärke der Abdeckung: a mit Baustoffen der RF1 0.5 mm; b mit Baustoffen der RF2 3 mm; c mit Baustoffen der RF3 5 mm*» (VKF Brandschutzrichtlinie Verwendung von Baustoffen, 14-15de, Abschnitt 2 Abs. 2; [10])
- Detaillierte Anforderungen in Abhängigkeit von der Art des Gebäudes und der Einbausituation sind auch tabellarisch in der VKF Brandschutzrichtlinie Verwendung von Baustoffen enthalten und über eine farbliche Legende zu lesen (Beispiel in Abbildung 3)

RF1
RF2
RF3
Keine Anwendung
– Keine Anforderung
cr = Baustoffe mit „kritischem Verhalten“ sind anwendbar

			Gebäude geringer und mittlerer Höhe								Hochhäuser							
			Wände, Decken und Stützen mit Feuerwiderstandsanforderung	Wände, Decken und Stützen ohne Feuerwiderstandsanforderung	Dämm- / Zwischenschichten	Wand- und Deckenbekleidungen, abgehängte Decken, Doppelböden	Klassifizierte Systeme	Deckenbespannungen	Bodenbeläge	Treppen- und Podestkonstruktionen	Wände, Decken und Stützen mit Feuerwiderstandsanforderung	Wände, Decken und Stützen ohne Feuerwiderstandsanforderung	Dämm- / Zwischenschichten	Wand- und Deckenbekleidungen, abgehängte Decken, Doppelböden	Klassifizierte Systeme	Deckenbespannungen	Bodenbeläge	Treppen- und Podestkonstruktionen
Fluchtwege	Vertikale Fluchtwege	Bauliches Konzept	[7]	[1]	[1] [5]	[2]	[2]		[3]	[3]				[2]	[2]			
		Löschanlagen-konzept	[1]	[1]	[1]	[2]	[2]			[3]				[2]	[2]			
	Horizontale Fluchtwege	Bauliches Konzept	[1] [6]	[1]	[1]	[2]	[2]	[4]						[2]	[2]	[4]		
		Löschanlagen-konzept						[4]						[2]	[2]	[4]		
Übrige Innenräume	Beherber-gungsbetrie-be [a]	Bauliches Konzept	[7]		[5]		[5]	[4]	cr				[5]		[5]	[4]	cr	
		Löschanlagen-konzept						[4]	cr				[5]		[5]	[4]	cr	
	Räume mit grosser Personen-belegung	Bauliches Konzept						[4]	cr				[5]		[5]	[4]	cr	
		Löschanlagen-konzept						[4]	cr				[5]		[5]	[4]	cr	
	Übrige Nut-zungen	Bauliches Konzept							cr				[5]		[5]	[4]	cr	
		Löschanlagen-konzept							cr		[7]		[5]				cr	

Abbildung 3: Tabelle 4.2 «Anforderungen an das Brandverhalten von Fluchtwegen und Innenräumen» der VKF-Brandschutzrichtlinie Verwendung von Baustoffen; die Angaben in eckigen Klammern in den Tabellen-Zellen verweisen auf spezielle Regelungen und Ausnahmen zum jeweiligen Fall ([10])

– Bemerkenswert ist der großzügige Umgang mit brennbaren Oberflächen-Beschichtungen. Nach VKF Brandschutzrichtlinie Verwendung von Baustoffen, 14-15de, Abschnitt 2 Abs. 8 dürfen Baustoffe «*… brennbare Beschichtungen wie Anstriche, Wandbekleidungen, Furniere usw. aufweisen, sofern die Dicke der Beschichtung 1.5 mm nicht übersteigt. An das Brandverhalten der Beschichtungen werden keine Anforderungen gestellt.*» Würden Trägerplatten der Klasse A2 – s1,d0 oder A1 nach EN 13501-1 mit solchen Beschichtungen im Verbund geprüft, würden sie die Klassifizierungskriterien für ihre ursprüngliche Brandverhaltensklasse nicht mehr einhalten; neben dem erhöhten Brennwert könnte es insbesondere zu einer stärkeren Rauchentwicklung kommen; brennendes Abfallen oder Abtropfen ist denkbar. Dennoch erlauben die VKF Brandschutzvorschriften ausdrücklich dieses Vorgehen.

2. Leistungsangabe zum Brandverhalten nach EN 13501-1

EN 13501-1 [1] wird zur Klassifizierung des Brandverhaltens von Baustoffen auf europäischer Ebene genutzt. Diese Klassifizierung ist obligatorisch für Bauprodukte im Geltungsbereich harmonisierter Normen nach der Bauprodukteverordnung (BauPVO) [12], wenn in den jeweiligen harmonisierten Normen das Brandverhalten als Wesentliches Merkmal enthalten ist. Dasselbe gilt für Bauprodukte mit Europäischer Technischer Bewertung, bei denen das Brandverhalten ein Wesentliches Merkmal ist. Für solche Bauprodukte muss

eine Leistungserklärung (LE) erstellt und die CE-Kennzeichnung angebracht werden. Für andere Baustoffe und Bauprodukte, für die keine LE aufgrund der BauPVO erstellt werden muss und die keine CE-Kennzeichnung aufgrund der BauPVO tragen, sind auch andere Klassifizierungen (z.B. nach DIN 4102-1 [13]) möglich, teilweise sogar erforderlich. Auf alternative Klassifizierungen soll jedoch im Beitrag nicht weiter eingegangen werden.

Für die unterschiedlichen Klassifizierungen müssen in verschiedenen Prüfungen der Baustoffe jeweils bestimmte Grenzwerte eingehalten werden. Insgesamt ergeben sich für Baustoffe außer Bodenbeläge, Kabel (elektrische Leitungen) und Bedachungen 40 verschiedene mögliche Leistungsangaben zum Brandverhalten. Dieselben Möglichkeiten bestehen für lineare Rohrdämmstoffe, deren Klassifizierung durch einen zusätzlichen Index «L» hinter der grundlegenden Klasse gekennzeichnet werden (Tabelle 1). Bodenbeläge, Kabel und Bedachungen folgen anderen Klassifizierungssystemen, auf die in diesem Beitrag nicht weiter eingegangen werden soll.

Tabelle 1: Mögliche Leistungsangaben nach EN 13501-1 für das Brandverhalten von Baustoffen (ohne Bodenbeläge, Kabel und Bedachungen); gilt analog für lineare Rohrdämmstoffe, dann mit zusätzlichem Index «L» hinter der Klassenangabe (z.B. C_L - s2,d0)

A1		
A2 – s1,d0 A2 – s2,d0 A2 – s3,d0	A2 – s1,d1 A2 – s2,d1 A2 – s3,d1	A2 – s1,d2 A2 – s2,d2 A2 – s3,d2
B – s1,d0 B – s2,d0 B – s3,d0	B – s1,d1 B – s2,d1 B – s3,d1	B – s1,d2 B – s2,d2 B – s3,d2
C – s1,d0 C – s2,d0 C – s3,d0	C – s1,d1 C – s2,d1 C – s3,d1	C – s1,d2 C – s2,d2 C – s3,d2
D – s1,d0 D – s2,d0 D – s3,d0	D – s1,d1 D – s2,d1 D – s3,d1	D – s1,d2 D – s2,d2 D – s3,d2
E		E – d2
		F

Um zu beurteilen, ob «Mindest»-Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen eingehalten werden, ist es notwendig, das Klassifizierungssystem zu kennen und zu wissen, welche der Leistungsangaben jeweils «besser» ist. Dabei müssen stets alle (bis zu drei) relevanten Komponenten der Anforderung in das Urteil mit einbezogen werden.

- Die grundlegenden Klassen F bis A1 werden von F bis B, danach A2 und schließlich A1 immer besser.
- Bei der Brandnebenerscheinung Rauch (s für engl. smoke) ist s3 die schlechteste und s1 die beste Leistung (unbeschränkte bzw. am stärksten beschränkte Rauchentwicklung)
- Beim brennenden Abtropfen oder Abfallen (d für engl. droplets) ist d2 die schlechteste und d0 die beste Leistung (unbeschränktes bzw. kein brennendes Abtropfen oder Abfallen)

Für die Klassen A1 und F werden keine Brandnebenerscheinungen angegeben. A1 impliziert jedoch s1 und d0. Für die Klasse E erfolgt keine Angabe zur Rauchentwicklung s; tritt brennendes Abtropfen oder Abfallen auf, wird zur Klasse E zusätzlich d2 angegeben, Klasse E ohne Zusatzangabe bedeutet, dass der Baustoff nicht brennend abtropft oder abfällt (entspricht d0).

3. Zuordnung der Leistungsangaben zu den Anforderungen

3.1. Zuordnungstabellen in D

In Deutschland wird die Zuordnung der Leistungsangaben zum Brandverhalten nach EN 13501-1 in Anhang 4 der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen [4] festgelegt. Tabelle 2 zeigt einen Auszug aus Tabelle 1.2 von Anhang 4 MVV TB seit Ausgabe 2023/1 (Spalte 3 für lineare Rohrdämmstoffe und Spalte 4 für Bodenbeläge wurden hier herausgenommen). Eine wesentliche Änderung gegenüber früheren Fassungen verbirgt sich in den Fußnoten der Tabelle für die Einträge mit einem oder zwei Sternchen (Asterisk) in Spalte 2, Zeilen 1, 2, 3 und 5.

Über die Fußnoten wird festgelegt, dass die jeweiligen bauaufsichtlichen Anforderungen an das Brandverhalten, für die mindestens die Brandnebenerscheinung s1 in der Klassifizierung benötigt wird, nur dann zugeordnet werden können, wenn
- entweder die Klassifizierung über eine der genannten CWFT-Entscheidungen erreicht wurde (also keine unmittelbare Prüfung des Brandverhaltens erfolgt ist, sondern die Klasse aufgrund anderer Kriterien bestimmt worden ist);
- oder die Klassifizierung auf einem SBI-Test (EN 13823 [15]) nach einer Fassung vor 2020 basiert
- oder beim SBI-Test (EN 13823) in der Fassung 2020 das Prüfergebnis TSP_{600s} einen Wert von höchstens 35 m² ergeben hat.

Ergänzender Hinweis: Zu EN 13823:2020 (sog. SBI-Test; [15]) ist zwischenzeitlich die Änderung EN 13823/A1:2022 erschienen. Beide Dokumente sind in DIN EN 13823:2023-04 konsolidiert und fast gleichzeitig mit MVV TB 2023/1 veröffentlicht worden. MVV TB 2023/1 berücksichtigt diese neue Fassung noch nicht. Da die Sachverhalte, welche die hier beschriebene MVV TB Änderung begründen, nicht geändert wurden, müssen die Anforderungen auch auf «jüngere» Ausgaben von EN 13823 übertragen werden.

Obwohl die Aufzählung der CWFT-Entscheidungen in der Fußnote der Tabelle 1.2 von Anhang 4 der MVV TB (hier Tabelle 2) nach vielen verschiedenen Produkten aussieht, profitieren von der Regelung nur wenige Bauprodukte. Ob die Klassifizierung eines Bauproduktes auf CWFT-Entscheidungen basiert, kann in der Leistungserklärung erkennbar sein: Wenn im Abschnitt «System(e) zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit» der LE für das Brandverhalten das AVCP-Verfahren 4 angegeben ist, basiert die Klassifizierung auf CWFT-Entscheidungen. Bei anderen AVCP-Verfahren (3, 2+, 1 oder 1+) liegt keine Klassifizierung aufgrund von CWFT vor. Allerdings wird nicht in allen Leistungserklärungen angegeben, für welche Merkmale welches AVCP-Verfahren angegeben wird: Stellenweise geben Leistungserklärungen nur das höchste AVCP-Verfahren an, das mindestens einer der erklärten Leistungen zugrunde liegt.

Tabelle 2: MVV TB 2023/1, Anhang 4, Tabelle 1.2 (gekürzt; Verweise siehe im Original [4])

	Bauaufsichtliche Anforderung	Mindestens erforderliche Leistungen Bauprodukte, ausgenommen lineare Rohrdämmstoffe und Bodenbeläge	weitere Merkmale (ausgenommen Bodenbeläge)
	1	2	5
1	nichtbrennbar	A2 – s1,d0*	Angabe: Glimmverhalten gemäß 1.3 und soweit erforderlich Rohdichte
2	nichtbrennbar und zusätzlich Schmelzpunkt > 1000 °C	A2 – s1,d0*	Angabe: Schmelzpunkt von mindestens 1000 °C und Glimmverhalten gemäß 1.3 und soweit erforderlich Rohdichte
3	schwerentflammbar und nicht brennend abfallend oder abtropfend, sowie geringe Rauchentwicklung	C – s1,d0**	Angabe: Glimmverhalten gemäß 1.3 und soweit erforderlich Rohdichte
4	schwerentflammbar und nicht brennend abfallend oder abtropfend	C – s2,d0	
5	schwerentflammbar und geringe Rauchentwicklung	C – s1,d2**	
6	schwerentflammbar	C – s2,d2	
7	normalentflammbar und nicht brennend abfallend oder abtropfend	E	-
8	normalentflammbar	E – d2	-

* Bei Prüfung gemäß EN 13823:2020 $TSP_{600s} \leq 35$ m²; diese Angabe ist nicht erforderlich bei Bauprodukten, deren Brandverhalten nach CWFT-Entscheidungen 2003/43/EG vom 17.01.2003 (Abl. L13/35), 2003/593/EG vom 07.08.2003 (Abl. L201/35), 2006/673/EG vom 05.10.2006 (Abl. L276/77) und 2010/83/EU vom 09.02.2010 (Abl. L38/13) sowie delegierte Verordnung (EU) 2017/1228 vom 20.03.2017 (Abl. L177/4) der Europäischen Kommission ohne Prüfung in die Klasse A2 – s1,d0 eingestuft ist.

** Bei Prüfung gemäß EN 13823:2020 $TSP_{600s} \leq 35$ m²; diese Angabe ist nicht erforderlich bei Bauprodukten, deren Brandverhalten nach CWFT-Entscheidungen 2003/43/EG vom 17.01.2003 (Abl. L13/35) und 2007/348/EG vom 15.05.2007 (Abl. L131/21) der Europäischen Kommission ohne Prüfung in die Klasse B – s1,d0 eingestuft ist.

Die Zuordnungstabellen in MVV TB Anhang 4 geben jeweils die «mindestens erforderliche» Klasse an (vgl. Tabelle 2). «Bessere» Klassen können derselben bauaufsichtlichen Anforderung zugeordnet werden. Deshalb ist es wichtig, das Klassifizierungssystem zu kennen (vgl. Abschnitt 2 in diesem Beitrag).

Leider bleibt im konkreten Kontext unklar, wie mit der Klasse A1 («besser» als A2 – s1,d0) umgegangen werden soll. Denn diese kann unter bestimmten Bedingungen auch auf einer SBI-Prüfung nach EN 13823 basieren – das ist jedoch nicht zwingend der Fall. Ob die Klassifizierung A1 (auch) auf einer SBI-Prüfung basiert, ist am Ergebnis nicht ersichtlich.

Falls dies der Fall ist, müssen in der SBI-Prüfung auch die Kriterien für s1 eingehalten sein, um A1 zu erreichen. Somit stellt sich die Frage, wie in diesen Fällen mit der neuen Grenze für TSP_{600s} umgegangen werden soll. Aus Sicht des Verfassers geht dies aus der aktuellen Tabelle nicht eindeutig hervor. Die Zweifel werden durch den fehlenden Bezug auf die sog. «deemed to satisfy»-Liste nach Entscheidung der Kommission (96/603/EG aktuelle Fassung) und die vorhandenen CWFT-Beschlüsse für A1-Klassifizierungen geschürt. Die «deemed to satisfy»-Liste erlaubt – analog zu den explizit aufgeführten CWFT-Regelungen für andere Klassen des Brandverhaltens – für bestimmte Produkte die Leistungsangabe A1 unter definierten Bedingungen. Es erscheint ratsam, bei A1-Klassifizierung auf Grundlage einer SBI-Prüfung auch (!) die TSP_{600s}-Grenze zu beachten. In Analogie zu den Regelungen für andere Mindest-Klassifizierungen mit s1 kann die TSP_{600s}-Begrenzung bei Leistungsermittlung über die «deemed to satisfy»-Liste, CWFT oder über SBI-Prüfung auf Grundlage von EN 13823 vor 2020 vernachlässigt werden.

Die Einführung der beiden Fußnoten in Tabelle 1.2 von Anhang 4 MVV TB hat relativ weitreichende Folgen: Nur wenn die LE eines Produktes vor dem 20.5.2020 (Verfügbarkeit von EN 13823:2020) ausgestellt worden ist, ändert sich zunächst nichts zu früheren MVV TB-Ausgaben. Bei jüngeren LE führt die neue Regelung jedoch zu Mehraufwand sowohl für die Personen, die Bauprodukte verwenden, als auch für Personen, die in die Bauleitung oder Bauüberwachung eingebunden sind: Sie müssen die ausreichende Entscheidungsgrundlage beschaffen, ob ein gegenständliches Produkt der bauaufsichtlichen Anforderung «nichtbrennbar» zugeordnet werden kann. Dabei bestehen folgende Schwierigkeiten:

- Aus LE und CE-Kennzeichnung der Bauprodukte ist nicht in allen Fällen ersichtlich, ob die Leistungsangabe auf Prüfung oder auf CWFT / «Deemed to satisfy» beruht. Wird für alle erklärten Merkmale oder speziell für das Brandverhalten AVCP 4 angegeben, dann ist CWFT / «Deemed to satisfy» gegeben.
- Aus LE und CE-Kennzeichnung ist nicht ersichtlich, ob die Prüfung nach EN 13823 Ausgabe 2020 (oder später) oder nach einer früheren Ausgabe erfolgt ist (sofern die LE nicht vor 20.5.2020 datiert ist).
- Aus LE und CE-Kennzeichnung ist der Wert des Prüfergebnis TSP_{600s} nicht ersichtlich.
- Es ist diskutabel, ob die herstellenden Unternehmen den TSP_{600s}-Wert angeben dürfen. Denn nach Art. 8 Abs. 3 BauPVO ist die CE-Kennzeichnung für Produkte im Geltungsbereich der BauPVO «*die einzige Kennzeichnung, die die Konformität des Bauprodukts mit der erklärten Leistung in Bezug auf die Wesentlichen Merkmale, die von dieser harmonisierten Norm oder der Europäischen Technischen Bewertung erfasst sind, bescheinigt*». Das Brandverhalten selbst ist (meist) ein Wesentliches Merkmal der Bauprodukte, der TSP_{600s}-Wert ist ein Teil davon – er fließt in die Klassifizierung nach EN 13501-1 ein und kann damit als «erfasst» angesehen werden.
- Es gibt keinerlei Rechtsgrundlage für oder Anspruch auf eine Angabe des TSP_{600s}-Wert durch die herstellenden Unternehmen. Folglich könnte es nicht nur bei im EU-Binnenmarkt grenzüberschreitend gehandelten Bauprodukten für Verwender*innen schwierig sein, diesen Wert in Erfahrung zu bringen.

Trotzdem werden diese Angaben benötigt, wenn ein Produkt nach bauaufsichtlichen Anforderungen nichtbrennbar (oder schwerentflammbar mit geringer Rauchentwicklung) sein muss und die LE ab dem 20.5.2020 ausgestellt worden ist. Wenn keine entsprechende bauaufsichtliche Anforderung besteht, braucht darauf keine Rücksicht genommen zu werden. Ein Textvorschlag für eine Anfrage an die herstellenden Unternehmen enthält der folgende Kasten.

Textvorschlag für Anfrage an herstellende Unternehmen

Guten Tag,
Ihr Produkt … weist in der Leistungserklärung … vom … zum Brandverhalten die Klasse A2 – s1,d0 [oder A1] aus. Für die Zuordnung zur bestehenden bauaufsichtlichen Anforderung «nichtbrennbar» müssen mir nach MVV TB 2023/1 Anhang 4 Tabelle 1.2 weitere Angaben vorliegen. Geben Sie mir deswegen bitte schriftlich an:

- Wurde die Leistung aufgrund einer der CWFT-Regelungen 2003/43/EG, 2003/593/EG, 2006/673/EG, 2010/83/EU, (EU) 2017/1228, 2010/737/EU, 2010/738/EU oder 96/603/EG (wie geändert) der EU-Kommission ermittelt?
- Wurde die Leistung durch SBI-Prüfung auf Grundlage von EN 13823 in einer älteren Fassung als Ausgabe 2020 ermittelt?
- Falls die Leistung durch SBI-Prüfung nach EN 13823:2020 (oder jünger) ermittelt worden ist: Welcher Wert für das (Teil-)Ergebnis TSP_{600s} liegt der Klassifizierung zugrunde?
- [Nur bei «glimm-gefährdeten» Produkte nach MVV TB 2023/1 Anhang 4 Abschnitt 1.3] Wie ist das Ergebnis der Prüfung des genannten Bauproduktes nach EN 16733:2016?

Vielen Dank.
Freundliche Grüße …

Es stellt sich darüber hinaus die Frage, warum in Anhang 4 Tabelle 1.2 MVV TB der Schmelzpunkt (von Mineralwolle-Dämmstoffen) an die Zuordnung zum Brandverhalten gekoppelt wird. An dieses Merkmal werden zwar häufig Anforderungen im Zusammenhang mit Brandschutzaspekten gestellt, aber es beeinflusst (anders als Schwelen/Glimmen) wohl nicht die zugrundeliegenden Überlegungen hinter § 26 Abs. 1 MBO zum Brandverhalten von Baustoffen. Es steht auch nicht im Kontext der langjährig dem nationalen Verständnis von «nichtbrennbar» oder «schwerentflammbar» zugrunde liegenden Prüfszenarien aus DIN 4102-1. Stellenweise bestehen auch Anforderungen an die Dichte von Baustoffen, wofür obige Aussagen analog gelten.

Anforderungen an Schmelzpunkt und Dichte können fraglos isoliert betrachtet werden und müssen selbstverständlich beachtet werden, sollten jedoch von der Zuordnung zur bauaufsichtlichen Anforderung an das Brandverhalten entkoppelt werden.

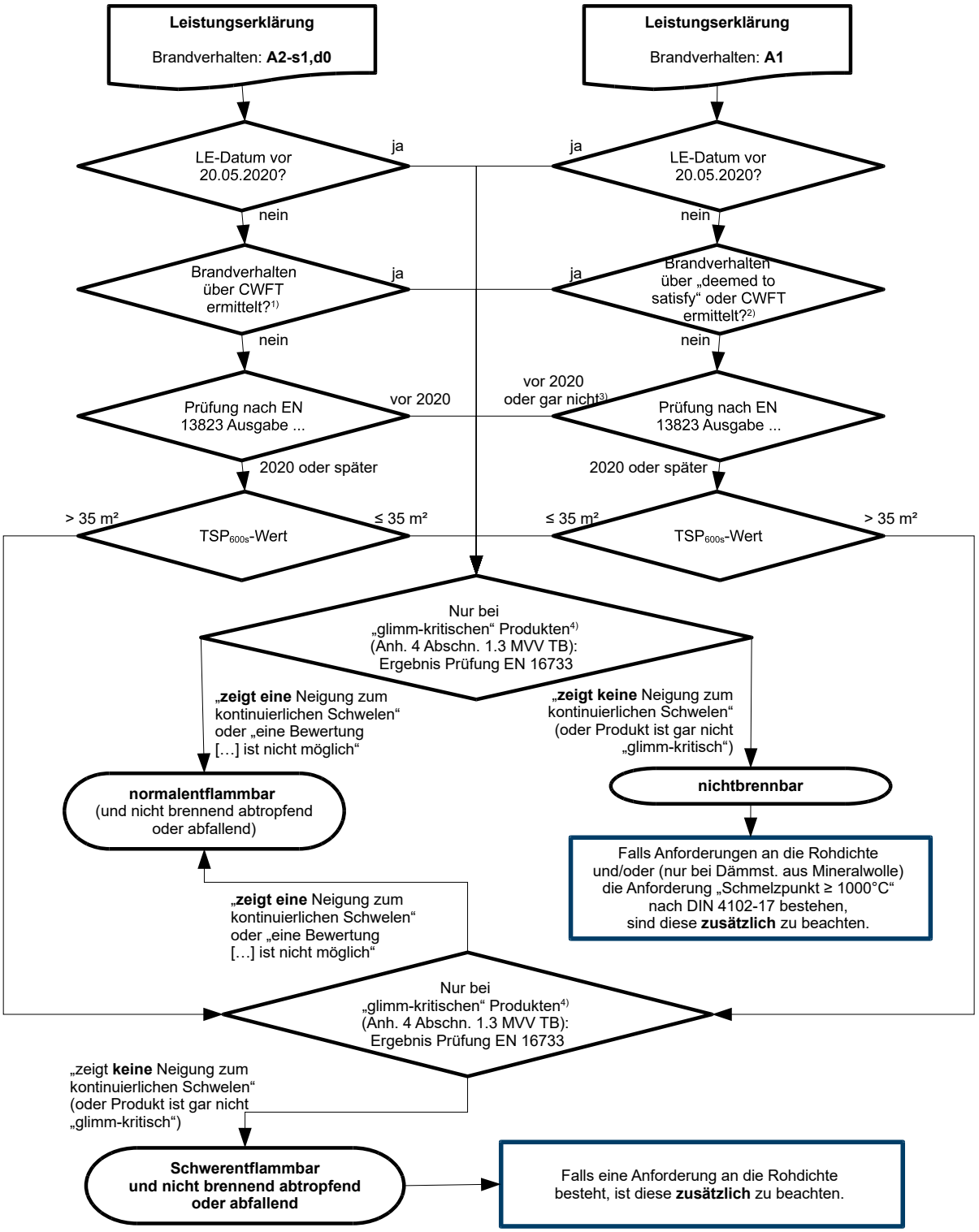
Bauprodukte, die zwar die Brandnebenerscheinung s1 ausweisen, aber bei Prüfung auf Grundlage von EN 13823:2020 $TSP_{600s} > 35$ m² haben, rutschen in die nächst-schlechtere Klasse ab, deren Mindest-Kriterien sie erfüllen: Sie gelten somit (nur) als «schwerentflammbar und nicht brennend abfallend oder abtropfend» (Tabelle 2 in diesem Beitrag, Zeile 4); die Mindestanforderung für «schwerentflammbar und geringe Rauchentwicklung und nicht brennend abfallend oder abtropfend» (Tabelle 2 in diesem Beitrag, Zeile 3) erfüllen sie ja nicht, dort wäre auch die TSP_{600s}-Grenze zusätzlich zu s1 gefordert. Bauprodukte mit Klasse B - s1,d0 oder C - s1,d0, die bei Prüfung nach EN 13823:2020 $TSP_{600s} > 35$ m² haben, gelten ebenfalls als «schwerentflammbar und nicht brennend abfallend oder abtropfend». Eine Übersicht der Zuordnung für ausgewählte Anforderungen an das Brandverhalten zu allen möglichen Klassen nach EN 13501-1 in Anlehnung an Anhang 4 Tabelle 1.2 MVV TB 2023/1 zeigt Tabelle 3. Darin sind die Zeilen 3, 5 und 7 aus der MVV TB vernachlässigt, weil diese Anforderungen nicht in bauaufsichtlichen Standard-Anforderungen vorkommen. Auf Zeile 2 wurde verzichtet, weil – wie oben beschrieben – der Schmelzpunkt von Dämmstoffen aus Mineralwolle von der Zuordnung zum Brandverhalten entkoppelt werden sollte, und sie dadurch mit Zeile 1 zusammenfällt. Dafür wurden diejenigen (möglichen) Leistungsangaben hinzugefügt, die zu «leichtentflammbar» im Sinne der MBO führen würden. Abbildung 4 zeigt zusätzlich ein Ablaufdiagramm, wie die Leistungsangaben A1 oder A2 – s1,d0 in LE den Begriffen bauaufsichtlicher Anforderungen zugeordnet werden können. Für Bauprodukte, die schwerentflammbar sein müssen (auch für lineare Rohrdämmstoffe) – sei hier daran erinnert, dass bereits seit MVV TB 2019/1 die Brandnebenerscheinung s2 erforderlich ist! Bei Brandnebenerscheinung s3 sind Produkte aller Klassen (nur) normalentflammbar.

Tabelle 3: Zuordnung für ausgewählte Anforderungen an das Brandverhalten zu Klassen nach EN 13501-1 in Anlehnung an MVV TB 2023/1 Anhang 4 Tabelle 1.2

<table>
<tr><th>Bauaufsichtliche Anforderung</th><th>Mindestens erforderliche Klasse</th><th colspan="3">weitere mögliche Klassen bis zur nächsthöheren bauaufsichtlichen Anforderung</th></tr>
<tr><td>nichtbrennbar*</td><td>A2 - s1,d0
entweder CWFT für Gipsplatten EN 520 / Spachtelmassen EN 13963 / Putze EN 998-1
oder Prüfung nach EN 13823 vor 2020;
nur im Fall einer Klassifizierung auf Basis von Prüfung nach EN 13823 ab 2020 ist zusätzlich TSP_{600s} ≤ 35 m² erforderlich</td><td colspan="3">A1
nur im Fall einer Klassifizierung auf Basis von Prüfung nach EN 13823 ab 2020 zusätzlich TSP_{600s} ≤ 35 m² erforderlich</td></tr>
<tr><td rowspan="9">schwerentflammbar und nicht brennend abfallend oder abtropfend*</td><td rowspan="9">C - s2,d0</td><td colspan="3">A1
im Fall einer Klassifizierung auf Basis von Prüfung nach EN 13823 ab 2020 mit TSP_{600s} > 35 m²</td></tr>
<tr><td colspan="3">A2 - s1,d0
im Fall einer Klassifizierung auf Basis von Prüfung nach EN 13823 ab 2020 mit TSP_{600s} > 35 m²</td></tr>
<tr><td>A2 - s2,d0</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>B - s1,d0</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>B - s2,d0</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>C - s1,d0</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="6">schwerentflammbar*</td><td rowspan="6">C - s2,d2</td><td>A2 - s1,d1</td><td>A2 - s1,d2</td></tr>
<tr><td>A2 - s2,d1</td><td>A2 - s2,d2</td></tr>
<tr><td>B - s1,d1</td><td>B - s1,d2</td></tr>
<tr><td>B - s2,d1</td><td>B - s2,d2</td></tr>
<tr><td>C - s1,d1</td><td>C - s1,d2</td></tr>
<tr><td>C - s2,d1</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="8">normalentflammbar</td><td rowspan="8">E - d2</td><td>A2 - s3,d0</td><td>A2 - s3,d1</td><td>A2 - s3,d2</td></tr>
<tr><td>B - s3,d0</td><td>B - s3,d1</td><td>B - s3,d2</td></tr>
<tr><td>C - s3,d0</td><td>C - s3,d1</td><td>C - s3,d2</td></tr>
<tr><td>D - s1,d0</td><td>D - s1,d1</td><td>D - s1,d2</td></tr>
<tr><td>D - s2,d0</td><td>D - s2,d1</td><td>D - s2,d2</td></tr>
<tr><td>D - s3,d0</td><td>D - s3,d1</td><td>D - s3,d2</td></tr>
<tr><td colspan="3">E</td></tr>
<tr><td>leichtentflammbar**</td><td>NPD**</td><td colspan="3">F**</td></tr>
</table>

* glimm-gefährdete Produkte dürfen bei Prüfung nach EN 16733 keine Neigung zum kontinuierlichen Schwelen zeigen, vgl. MVV TB 2023/1 Anhang 4 Abschnitt 1.3

** *nicht in MVV TB 2023/1 angegeben*



1) dies gilt streng genommen nur für EN 520 (Gipsplatten), EN 13963 (Spachtelmassen) und EN 15824 sowie EN 998-1 (bestimmte Putze); es gibt allerdings bisher keine anderen CWFT-Grundlagen für A2 - s1,d0
2) «deemed to satisfy» für eine Reihe von Produkten, CWFT für EN 13815 (Formteile aus faserverstärktem Gips) und EN 14782 (Stahlbleche mit Polyester- bzw. Plastisol-Beschichtung)
3) Eine Prüfung nach EN 13823 ist für die Klasse A1 nicht zwingend erforderlich
4) EN 438-7, EN 13162, EN 13168, EN 13170, EN 13171, EN 13950, EN 13964, EN 13986, EN 14064-1, EN 14190, EN 14303, EN 15037-4, EN 15498

Abbildung 4: Ablauf-Diagramm zur Zuordnung der Klassen A2 – s1,d0 und A1 nach EN 13501-1 zu bauaufsichtlichen Anforderungen nach MVV TB 2023/1 Anhang 4 Tabelle 1.2

3.2. Zuordnungstabellen in A

Weil in den OIB-Richtlinien die Anforderungen an das Brandverhalten der Baustoffe unmittelbar als Klassen des Brandverhaltens nach EN 13501-1 angegeben sind, ist in den österreichischen Bundesländern, die sich auf die OIB-Richtlinien beziehen, keine Zuordnung mehr notwendig.

3.3. Zuordnungstabellen in CH

In der Schweiz erfolgt die Zuordnung der Leistungsangaben zum Brandverhalten nach EN 13501-1 in der VKF-Brandschutzrichtlinie Baustoffe und Bauteile / 13-15de [11] in Abschnitt 2.4.1 (Abbildung 5). Die Tabelle enthält für Baustoffe (ohne Bodenbeläge, Kabel und Bedachungen) sowie für lineare Rohrdämmstoffe jeweils alle 40 möglichen Klassen, so dass auch ohne erweiterte Kenntnis des Klassifizierungssystems eine eindeutige Zuordnung möglich ist. Trotz der deutlichen Betonung des Qualm-Verhaltens beim Brandverhalten von Baustoffen in der Schweiz nimmt die Tabelle bisher keine Rücksicht auf die Änderungen in EN 13823 ab 2020, die in Deutschland zur Änderung der Zuordnungstabellen geführt hat.

4. Exkurs: Hintergrund der geänderten Zuordnungstabellen und der Einführung der TSP_{600s}-Beschränkung in D

Mit EN 13823:2020 [15] wurde eine Änderung im Prüfverfahren eingeführt, welche die Mess-Ergebnisse eigentlich «genauer» und vom Prinzip her auch etwas reproduzierbarer macht. Sie soll hier stark vereinfacht dargestellt werden.

Die Prüfeinrichtung nach EN 13823 hat zwei baugleiche Brenner den sog. Hauptbrenner, mit dem die Probekörper in der Prüfung beansprucht werden, und den sog. Nebenbrenner. Der Nebenbrenner dient u.a. der regelmäßigen Kalibrierung der Prüfeinrichtung, um den «Eigenrauch» der Brenner (sozusagen das «Tara» der während der Brandprüfung gemessenen Gesamtrauchmenge also des «Brutto»-Ergebnisses) zu bestimmen. Das Messergebnis abzüglich des Eigenrauches des Brenners ergibt die («Netto»-) Rauchemissionen des geprüften Bauproduktes in der Baustoffklassenprüfung. Der Hauptbrenner kann jedoch – anders als der Nebenbrenner – durch die verschiedenen Brandprüfungen mit der Zeit «verschmutzen», z.B. durch in vorherigen Brandprüfungen in das Brennerbett gefallene Partikel. Dies kann dazu führen, dass der «Eigenrauch» des Hauptbrenners («echtes Tara») größer ist als der «Eigenrauch» des Nebenbrenners («theoretisches Tara»). Die Messergebnisse liegen dadurch jedoch auf der sicheren Seite, weil diese Differenz zwischen «theoretischem Tara» und «echtem Tara» ja dem «Netto-Rauch» des Probekörpers zufällt.

Die Kalibrierung für die Ermittlung der Kennwerte zum Rauch (neben dem hier erwähnten TSP_{600s} auch noch der Kennwert SMOGRA) erfolgte vor Ausgabe 2020 wahlweise täglich am Hauptbrenner oder (seltener) am Nebenbrenner. Seit Ausgabe 2020 ist die Kalibrierung am Hauptbrenner obligatorisch, die Ermittlung der Rauch-Kennwerte darf nicht mehr mit Kalibrierung am Nebenbrenner erfolgen. Da der Hauptbrenner im Allgemeinen etwas mehr «Eigenrauch» erzeugt als der Nebenbrenner, sind die Prüfergebnisse identischer Produkte bei Kalibrierung am Hauptbrenner i.d.R. etwas besser, als bei Kalibrierung am Nebenbrenner. Vor 2020 wurde der Prüfstand im Regelfall am Nebenbrenner kalibriert; nur wenn das beauftragende Unternehmen die Kalibrierung am Hauptbrenner extra beauftragt (und bezahlt) hat, konnte dies schon bisher durchgeführt werden. Seit der Ausgabe 2020 von EN 13823 ist die Kalibrierung am Hauptbrenner obligatorisch. Etwaige Eigenrauch-Differenzen zwischen Haupt- und Nebenbrenner entfallen dadurch. Das führt dazu, dass es Bauprodukte geben kann, die vor 2020 ein (Teil-) Prüfungsergebnis im SBI-Prüfstand von $TSP_{600s} > 50$ m² (als «Netto-Rauch») hatten und so nicht mehr die Brandnebenerscheinung s1 (für geringer Rauchentwicklung) erreicht haben – die jedoch nun, durch die Kalibrierung am Hauptbrenner, ein $TSP_{600s} \leq 50$ m² erzielen und so jetzt die Brandnebenerscheinung s1 erreichen.

Brandverhaltensgruppe	Kritisches Verhalten	Klassifizierung nach SN EN 13501-1:2009		
		Bauprodukte	Lineare Rohrdämmungen	Boden-beläge
RF1		A1 A2-s1,d0	$A1_L$ $A2_L$-s1,d0	$A1_{fl}$ $A2_{fl}$-s1
RF2		A2-s1,d1 A2-s2,d0 A2-s2,d1 B-s1,d0 B-s1,d1 B-s2,d0 B-s2,d1 C-s1,d0 C-s1,d1 C-s2,d0 C-s2,d1	$A2_L$-s1,d1 $A2_L$-s2,d0 $A2_L$-s2,d1 B_L-s1,d0 B_L-s1,d1 B_L-s2,d0 B_L-s2,d1 C_L-s1,d0 C_L-s1,d1 C_L-s2,d0 C_L-s2,d1	B_{fl}-s1 C_{fl}-s1
	cr	A2-s1,d2 A2-s2,d2 A2-s3,d0 A2-s3,d1 A2-s3,d2 B-s1,d2 B-s2,d2 B-s3,d0 B-s3,d1 B-s3,d2 C-s1,d2 C-s2,d2 C-s3,d0 C-s3,d1 C-s3,d2	$A2_L$-s1,d2 $A2_L$-s2,d2 $A2_L$-s3,d0 $A2_L$-s3,d1 $A2_L$-s3,d2 B_L-s1,d2 B_L-s2,d2 B_L-s3,d0 B_L-s3,d1 B_L-s3,d2 C_L-s1,d2 C_L-s2,d2 C_L-s3,d0 C_L-s3,d1 C_L-s3,d2	B_{fl}-s2 C_{fl}-s2
RF3		D-s1,d0 D-s1,d1 D-s2,d0 D-s2,d1	D_L-s1,d0 D_L-s1,d1 D_L-s2,d0 D_L-s2,d1	D_{fl}-s1
	cr	D-s1,d2 D-s2,d2 D-s3,d0 D-s3,d1 D-s3,d2 E E-d2	D_L-s1,d2 D_L-s2,d2 D_L-s3,d1 D_L-s3,d2 D_L-s3,d0 E_L E_L-d2	D_{fl}-s2 E_{fl}
RF4	–			
Kein Baustoff		F	F_L	F_{fl}

Anwendungsbeschränkung aufgrund des kritischen Verhaltens im Brandfall resp. aufgrund des unzulässigen Brandbeitrages.

Abbildung 5: Zuordnungstabelle für die Klassifizierung von Baustoffen nach SN EN 13501-1:2009 gemäß VKF-Brandschutzrichtlinie Baustoffe und Bauteile / 13-15de Abschnitt 2.4.1 [11]

5. Fazit

Die Verbindung zwischen Anforderungen und Leistungsangaben wird in Deutschland, Österreich und der Schweiz unterschiedlich behandelt.

- In Deutschland werden die bauaufsichtlichen Anforderungen an das Brandverhalten in den Texten der bauordnungsrechtlichen Regelwerke verbal gestellt. Die Zuordnung erfolgt über Anhang 4 der MVV TB. Darin sind nur die «mindestens erforderlichen» Leistungen angegeben, es bedarf also der detaillierten Kenntnis des Klassifizierungssystems. Für einige bauaufsichtliche Anforderungen, insbesondere die Anforderung nichtbrennbar, in bestimmten Fällen jedoch auch für die Anforderung schwerentflammbar, genügen die Angaben aus Leistungserklärungen von Bauprodukten mit Leistungserklärung und CE-Kennzeichnung aufgrund der BauPVO nicht, es werden weitere Leistungsangaben benötigt. Diese müssen beschafft und dokumentiert werden. Der Begrenzung der Rauchentwicklung wird dabei besondere Bedeutung beigemessen. Das System ist nicht trivial. Es ist jedoch möglich, auch andere Klassifizierungen des Brandverhaltens in (separaten) Zuordnungstabellen zu berücksichtigen.
- In Österreich werden die bautechnischen Anforderungen an das Brandverhalten der Baustoffe überwiegend in Tabellenform in den OIB-Richtlinien gestellt. Dabei werden unmittelbar die Klassifizierungen nach EN 13501-1 genutzt – alle Baustoffe müssen also nach EN 13501-1 klassifiziert sein. Im Gegenzug ist keine «Übersetzung» für die Zuordnung von Leistungen zu Anforderungen (oder umgekehrt) erforderlich. Im Vergleich zu D und CH erscheinen die Anforderungen stellenweise deutlich geringer, wenn z.B. nur eine Anforderung an die grundlegende Klasse des Brandverhaltens nach EN 13501-1 gestellt wird, ohne die Brandnebenerscheinungen s und d berücksichtigen zu müssen. Weitere Leistungsangaben, z.B. zum Schwel-/Glimm-Verhalten oder zur Rauchfreisetzung werden nicht benötigt.
- Die VKF-Brandschutzvorschriften stellen die Anforderungen mit speziellen Bezeichnungen, teilweise in Tabellenform und teilweise in Textform. In der VKF-Brandschutzrichtlinie Baustoffe und Bauteile sind Zuordnungstabellen enthalten, die jede mögliche Leistungsangabe zum Brandverhalten nach EN 13501-1 eindeutig einer der Bezeichnungen für die Anforderungen zuordnet. Weitere Leistungsangaben, z.B. zum Schwel-/Glimm-Verhalten oder zur Rauchfreisetzung werden nicht benötigt. Obwohl in den VKF-Vorschriften das Qualmverhalten der Baustoffe besonders betont wird, hat die Änderung von EN 13823:2020 gegenüber früheren Fassungen sich bisher nicht auf die Zuordnungstabellen in den VKF Brandschutzvorschriften ausgewirkt. Wie in D bietet das System die Möglichkeit, auch andere Klassifizierungen des Brandverhaltens in (separaten) Zuordnungstabellen zu berücksichtigen.

6. Literatur

[1] EN 13501, z.B. DIN EN 13501-1:2019-05 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Deutsche Fassung EN 13501-1:2018

[2] Muster-Bauordnung [für die BRD] – MBO, Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 22./23.09.2022; online verfügbar über https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Rechtsgrundlagen/MBO.PDF (zuletzt geprüft: 16.03.2024)

[3] DIN 4102-17: 2017-12 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 17: Schmelzpunkt von Mineralwolle-Dämmstoffen – Begriffe, Anforderungen und Prüfung

[4] Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen 2023/1 (MVV TB 2023/1) mit Druckfehlerberichtigung vom 10. Mai 2023; online verfügbar über https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Referat/P5/Technische_Bestimmungen/MVVTB_2023-1.pdf (zuletzt geprüft: 16.03.2024)

[5] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL) Fassung Oktober 2020; online verfügbar über https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Amtliche_Mitteilungen/2021_04_MHolzBauRL.pdf (zuletzt geprüft: 16.03.2024)

[6] Richtlinien des Österreichischen Instituts für Bautechnik – OIB-Richtlinie 2 Brandschutz (OIB-330.2-029/23), Mai 2023; online verfügbar über https://www.oib.or.at/sites/default/files/oib-rl_2_ausgabe_mai_2023.pdf (zuletzt geprüft: 16.03.2024)

[7] Richtlinien des Österreichischen Instituts für Bautechnik – Erläuternde Bemerkungen OIB-RL 2 Brandschutz (OIB-330.2-034/23), Mai 2023; online verfügbar über https://www.oib.or.at/sites/default/files/erlaeuterungen_oib-rl_2_ausgabe_mai_2023.pdf (zuletzt geprüft: 16.03.2024)

[8] Wiener Stadtentwicklungs-, Stadtplanungs- und Baugesetzbuch (Bauordnung für Wien – BO für Wien), zuletzt geändert LGBl. Nr. 37/2023 kundgemacht 13.12.2023; online verfügbar über https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrW&Gesetzesnummer=20000006 (zuletzt geprüft: 16.03.2024)

[9] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen: Brandschutznorm, 01.01.2015 / 1-15de; online verfügbar über https://services.vkg.ch/rest/public/georg/bs/publikation/documents/BSPUB-1394520214-57.pdf/content (zuletzt geprüft: 20.03.2024)

[10] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen: Brandschutzrichtlinie Verwendung von Baustoffen, 01.01.2017 / 14-15de; online verfügbar über https://services.vkg.ch/rest/public/georg/bs/publikation/documents/BSPUB-1394520214-77.pdf/content (zuletzt geprüft: 20.03.2024)

[11] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen: Brandschutzrichtlinie Baustoffe und Bauteile Klassifikation, 01.01.2017 / 13-15de; online verfügbar über https://services.vkg.ch/rest/public/georg/bs/publikation/documents/BSPUB-1394520214-71.pdf/content (zuletzt geprüft: 20.03.2024)

[12] Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, zuletzt geändert durch Verordnung (EU) 2019/1020 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 20. Juni 2019; «konsolidierte Fassung» online verfügbar über http://data.europa.eu/eli/reg/2011/305/2021-07-16 (zuletzt geprüft: 16.03.2024)

[13] DIN 4102-1:1998-05 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen

[14] EN 13823:2020, z.B. DIN EN 13823:2020-09 Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen; Deutsche Fassung EN 13823:2020

Geregeltes Bauen mit Holz bis zur Hochhausgrenze

Dr.-Ing. Michael Merk

Technische Universität München
Materialprüfungsamt für das Bauwesen
MPA München Innenstadt

FIRE & TIMBER .ING GmbH
FIRE & TIMBER PrüfSV
München, Deutschland



Geregeltes Bauen mit Holz bis zur Hochhausgrenze

Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL)
Entwurfsfassung September 2023

1. Wie kam es zu der Fortschreibung der aktuellen Richtlinie und wo steht das Verfahren im Moment?

Mit Einführung der fünf Gebäudeklassen in der MBO-2002 [1] wurde vor rund zwanzig Jahren die Öffnung des Bauens mit brennbaren Baustoffen für mehrgeschossige Gebäude eingeleitet. Für Gebäude der Gebäudeklasse 4 (13 Meter oberster Geschossfußboden bzw. rund fünf Geschosse) wurde gleichzeitig geregelt, dass für deren Errichtung hochfeuerhemmende Bauteile, bestehend aus einer brennbaren Trag- und Aussteifungskonstruktion, nichtbrennbaren Dämmstoffen und einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung, zu verwenden sind.

Im Jahr 2004 wurde dann die M-HFHHolzR [2] als erste zugehörige «Holzbaurichtlinie» zur Konkretisierung der Anforderungen an Holzbauelemente, deren Anschlüsse und mögliche Einbauten als Technische Baubestimmung eingeführt. Die damals ausschließlich geregelte Bauweise war der Holztafelbau mit einer «allseitigen» Bekleidung aus 2 x 18 mm Gipskarton Feuerschutz- oder Gipsfaserplatten und einer mineralischen Gefachdämmung mit einem Schmelzpunkt ≥ 1.000°C. Neben der Holztafelbauweise war als einzige Ausnahme der Einsatz der Brettstapelbauweise für Decken zulässig. Sonstige Massivholzbauweisen waren seinerzeit noch nicht geregelt, da insbesondere die Brettsperrholzbauweise (CLT) zur Zeit dieser Richtlinienarbeit noch neuartig war und keine gängige Bauweise darstellte.

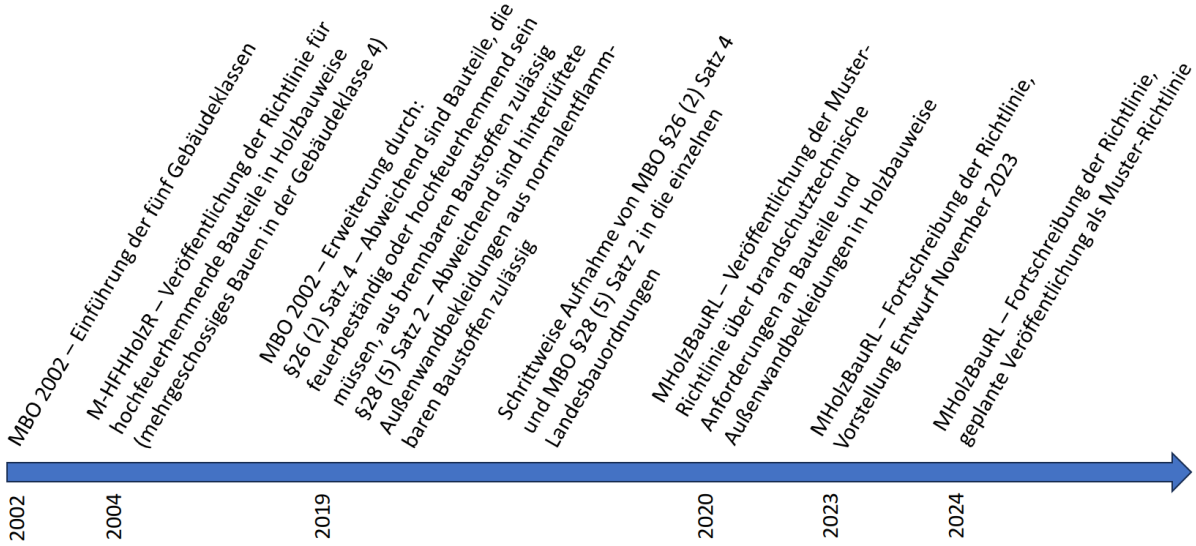


Abbildung 1: historische Entwicklung der Regelungen zum mehrgeschossigen Bauen mit Holz (Stand 03-2024)

Im Herbst 2019 wurde die MBO 2002 [3] erneut in Bezug auf die Verwendung brennbarer Baustoffe erweitert. Es erfolgte die bauordnungsrechtliche Öffnung für den Holzbau in die Gebäudeklasse 5 bis zur Hochhausgrenze (bis 22 Meter bzw. rund acht Geschosse). Nahezu gleichzeitig wurde eine dahingehend erweiterte «Holzbaurichtlinie», jetzt MHolzBauRL [4], veröffentlicht. Diese enthielt insbesondere die Konkretisierung von Bauteilen, die anstelle der feuerbeständigen Bauweise, auch unter Verwendung von brennbaren Baustoffen in den wesentlichen Bestandteilen zum Einsatz kommen dürfen. Dabei wurde für abweichend feuerbeständige Bauteile als einzige Bauweise die Massivholzbauweise (Brettsperrholz oder Brettschichtholz) zugelassen.

Von Anfang an war klar, dass zur aktuell vorliegenden Richtlinie noch wesentliche Lücken zu schließen sind. Hierfür wurde Anfang 2021 im Auftrag der Bauministerkonferenz eine «Projektgruppe MHolzBauRL» (PG MHolzBauRL) ins Leben gerufen. Als Ergebnis ihrer Richtlinienarbeit hat diese 2023 den jetzt vorliegenden Entwurf [5] veröffentlicht.

2. Wo steht die Richtlinienarbeit derzeit?

Am 20.11.2023 fand in Berlin eine öffentliche Vorstellung des Entwurfes zur MHolzBauRL 2023 statt. Hierzu waren Behörden, Verbände und sonstige interessierte Kreise eingeladen. Im Anschluss an die Vorstellung wurde eine sechswöchige, öffentliche Anhörung (Einspruchsfrist) gestartet. Die Rückmeldungen werden derzeit durch die PG MHolzBauRL behandelt bzw. abgearbeitet.
Ziel ist, Ende Mai 2024 alle Einsprüche zu behandeln und vor dem Sommer 2024 die Richtlinie an die Fachkommission Bauaufsicht zu übergeben und damit im Anschluss das erforderlich europäische Notifizierungsverfahren einzuleiten.
Ab Herbst 2024, sofern alles planmäßig abläuft, wird die Richtlinie aller Voraussicht nach seitens des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) veröffentlicht und als Muster den Bundesländern zur Verfügung gestellt. Wie schnell dann die einzelnen Länder die Richtlinie umsetzen, wird unterschiedlich sein. Grundsätzlich erfolgt die Einführung in jedem Bundesland durch die jeweiligen Technischen Baubestimmungen, die üblicherweise einmal jährlich veröffentlicht werden. Es ist vorstellbar, dass unabhängig davon Bauvorhaben bereits nach der neuen Richtlinie im Rahmen von Abweichungsanträgen geplant und ausgeführt werden können. Auch ist eine Vorablegitimierung im Rahmen von Vollzugshinweisen (wie z.B. in Bayern bereits 2021 im Zuge der MHolzBauRL 2020 vorgenommen) denkbar, bis dann über die Technischen Baubestimmung die endgültige Einführung erfolgt.

3. Wo kann die Richtlinie angewendet werden, was beinhaltet sie und was wurde im Rahmen der Fortschreibung verändert?

3.1. Fortschreibung der Richtlinie

Grundsätzlich bietet die fortgeschriebene Richtlinie nun vollständige Regelungen für den Umgang mit dem brennbarem Baustoff Holz bis zur Hochhausgrenze, also in der Regel bis zu acht Geschossen. Dies gilt für die bewährten Bauweisen, einerseits für den Holztafelbau, aber wie schon in der Vorgängerversion auch für die verschiedenen Massivholzbauweisen. Damit ist nun eine praktische Anwendung möglich und an vielen Stellen wird das «Holzbauerleben» deutlich leichter gemacht.
Neben dem reinen Neubau können mit der Holzbaurichtlinie auch Aufstockungen zur Nachverdichtung und Holzaußenwandbekleidungen auf Außenwandbauteile zur energetischen Sanierung oder einfach nur auf mineralischen Außenwänden realisiert werden. Die nun weitaus vielschichtigere Anwendbarkeit dieses Regelwerks lässt sich bereits am Inhaltsverzeichnis und der Beschreibung des Anwendungsbereiches erkennen.
Sonderbauten sind grundsätzlich nicht mehr ausgeschlossen. Ausgenommen werden nach derzeitigem Stand im Anwendungsbereich nur Gebäude mit Räumen oder Raumgruppen über 400 m² sowie Nutzungen, bei denen sich bestimmungsgemäß Personen mit eingeschränkter Selbstrettungsfähigkeit aufhalten (z.B. Schulen, Kindergärten, Pflegeeinheiten, etc.). Hier ist die Richtlinie zunächst nicht anwendbar, gut begründbare Ausnahmefälle sind aber durchaus im Rahmen von Brandschutznachweisen mit entsprechenden Abweichungsanträgen denkbar und somit grundsätzlich auch nicht ausgeschlossen.
Neben den grundsätzlichen Regelungen für die beiden Holzbauweisen Holztafelbau und Massivholzbau, also der technischen Beschreibung, wie diese zu planen und auszuführen sind, wurden erweiterte Regelungen für die Anordnung von Installationen festgeschrieben.



Abbildung 2: ToDos für die Fortschreibung (rot – vornehmliche Arbeitsbereiche)

Es wurden Regelungen für reduzierte Brandschutzbekleidungen, insbesondere für die Holztafelbauweise geschaffen. Dies bedeutet, dass der Holztafelbau unter definierten Rahmenbedingungen in der Gebäudeklasse 4 anstelle der bisher ausschließlich bekannten 2 x 18 mm mineralischen Gipsbekleidungen (Gipskartonfeuerschutz- und Gipsfaserplatten) jetzt auch reduziert mit 2 x 15 mm Gips- bzw. sogar nur mit einer Holzwerkstoffplatte und nur einer Gipsplatte mit 1 x 18 mm auskommt. In der Gebäudeklasse 5 bleibt es zunächst bei einer Bekleidung mit 2 x 18 mm.
Eine wesentliche Neuerung stellt bei den brandschutztechnischen Bekleidungen die Umstellung auf ein alternatives (t_{ch}-) Verfahren dar. Dadurch können vor allem vorhandene und bisher nicht genutzte Leistungsreserven bei den Gipsbekleidungen geltend gemacht werden. Andererseits bietet dieses Verfahren aber auch die Möglichkeit, alternative Bekleidungswerkstoffe für die Holzbauweisen anwendbar zu machen. Diese Umstellung der Beurteilung von einer K_2-Leistung auf eine t_{ch}-Leistung kommt insbesondere dem ökologischen und nachhaltigem Bauen zugute. Hier ist zum Beispiel die künftige Möglichkeit der Beurteilung von Lehmbauplatten als Brandschutzbekleidung zu nennen. Aber auch andere, ggf. neuartige Bau- und Werkstoffe sind für eine Brandschutzbekleidung denkbar. Um Verständnis im Namen der PG MHolzBauRL möchte ich an dieser Stelle werben, dass für die nahe Zukunft die Verwendung von biogenen Dämmstoffen in tragenden und/oder raumabschließenden Bauteilen nach der Richtlinie weiterhin noch keine Lösungen gefunden werden konnte. Auch wenn dazu in Baden-Württemberg bereits eine eingeschränkte Anwendung möglich ist, war auf Grund der negativen Erfahrungen aus Brandereignissen, insbesondere hinsichtlich der Löschbarkeit solcher Konstruktionen eine generelle Öffnung innerhalb der Richtlinienarbeit noch nicht vereinbar. Hier müssen noch weitere Erkenntnisse gefunden und Konstruktionsregelungen zum Umgang mit dieser Art der Dämmstoffe erarbeitet werden. Es ist allgemeiner Konsens, dass an dieser Thematik weitergearbeitet wird und eine weitere Fortschreibung der MHolzBauRL diese Bauweisen zukünftig beinhalten soll.
Grundsätzlich ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass der Einsatz von biogenen bzw. normalentflammbaren Dämmstoffen in nichttragenden Außenwänden und Dachkonstruktionen bauordnungsrechtlich nicht ausgeschlossen ist und somit durch intelligentes Planen deren Einsatz auch für Gebäude bis zur Hochhausgrenze abweichungsfrei zulässig ist. Der Ausschluss beschränkt sich lediglich auf die durch die Holzbaurichtlinie geregelten Bauteile, die tragend und/oder raumabschließend hochfeuerhemmend, abweichend zu hochfeuerhemmend oder abweichend feuerbeständig sein müssen.
Die bereits seit der MHolzBauRL Fassung 2020 bewährten Regelungen zum Umgang mit brennbaren Bauteiloberflächen bleiben unverändert: In Nutzungseinheiten bzw. brandschutztechnisch abgetrennten Räumen oder Raumgruppen bis 200 m² dürfen Deckenuntersichten oder 25% aller Wandoberflächen holzsichtig bleiben. Sowohl die quantifizierbaren Auswirkungen dieser zusätzlichen immobilen Brandlasten auf die Brandausbreitungsgeschwindigkeiten als auch der negative Einfluss auf die Fassade über dem Brandgeschoss haben eine weitere Öffnung auf Basis des derzeitigem Wissenstandes nicht erlaubt.

Bezüglich der Ausbildung von Außenwandbekleidungen in Holz bis zur Hochhausgrenze wurden kleinere Konkretisierungen und Anpassungen vorgenommen. Zum Beispiel wurden Korrekturen bei Brettdicken (Zollschalung) oder der Tiefe der Hinterlüftungsebene vorgenommen. Damit stimmen die Regelungen der Holzbaurichtlinie nun auch mit den Fachregeln des Zimmererhandwerks überein.
Die Anforderungen an die geschoßweise Unterbrechung der brennbaren Außenwandbekleidung bleiben unverändert. Neu hinzugekommen ist die Forderung, dass bei hohen, fensterlosen Gebäuden (z.B. Kletterhallen), ein maximaler Abstand zwischen Brandsperren von 4 Meter eingehalten werden muss. Darüber hinaus wurden weitere Planungsgrundsätze, wie zum Beispiel die Regelung der Integration von Regenfallrohren mit aufgenommen.
Ein letzter Punkt in diesem Regelungsabschnitt ist die Konkretisierung der direkten Erreichbarkeit von Außenwandbekleidungen aus Holz für die Brandbekämpfung. Damit wird die Möglichkeit geschaffen, bei «niedrigeren» Mehrgeschossern (Gebäudeklasse 4) auch eine bodengestützte Brandbekämpfung zu ermöglichen. Das bringt den Verzicht auf notwendige Zufahrten und Bewegungsflächen für Einsatzfahrzeuge, z.B. für rückwärtige Gebäudeseiten, mit sich. Ergänzende Unterlagen wurden hierzu bereits durch die Vertreter der Feuerwehren (AGBF, DFV) [6] erarbeitet.
Als große Weiterentwicklung kann die Aufnahme von systematischen Regelungen zu Fügungen und Anschlüssen in dieser Richtlinie gewertet werden. Hier konnte das vorherige System, bestehend aus Prinzipskizzen für einzelne wenige Anschlüsse, auf allgemeingültige Konstruktionsregeln, mit denen nun jegliche Fügungen und Anschlüsse abbildbar sind, abgeändert werden. Die Veröffentlichung des INFORMATIONSDIENST HOLZ «Leitdetails für Bauteilanschlüsse in den Gebäudeklassen 4 und 5» [7] ist als zu Grunde liegendes Leitdokument zu verstehen.
Die Richtlinie bietet nun für die Bauarten des mehrgeschossigen Holzbaus ein vollständiges «Baukastensystem», welches grundsätzlich ermöglichen sollte, die unzähligen Einzelnachweise im Rahmen von Bauartgenehmigungen mehr oder minder auf ein Minimum zu reduzieren. Dies wäre als großer Fortschritt anzusehen. Hält man sich an die neue Holzbaurichtlinie, kann mit Einführung dieser im Grunde abweichungsfrei und ohne große zusätzliche Nachweise gebaut werden. Damit ist ein großer Teil des Weges zurückgelegt und die Anforderungsseite klar definiert, die Festlegungen auf der Nachweisseite bilden jetzt noch die letzte Herausforderung.

3.2. Der Leistungsnachweis von Bauteilen und Bekleidungen

Bis zum Schluss spannend bleibt, wie sich die Regelungen auf der Nachweisseite entwickeln. Mit Einführung der MHolzBauRL im Jahr 2020 wurde seitens der Bauaufsicht irrtümlicherweise angenommen, dass die Richtlinie als übergeordneter Rahmen für die Bauarten gilt und sich über die eingeführten Technischen Baubestimmungen DIN 4102-4 [8] und DIN EN 1995-1-2 [9] aus brandschutztechnischer Sicht alle Nachweise erbringen lassen. Demzufolge wurden aus der Muster Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) sowohl die zuvor über die Zeit der M-HFHHolzR genutzten Prüfzeugnisse (für hochfeuerhemmende Bauprodukte) nach Punkt C 3.21 gestrichen, als auch aus den «normalen» Prüfzeugnissen für Bauarten nach Punkt C 4.1 die Bauteile im Geltungsbereich der MHolzBauRL ausgenommen. In der Praxis führt diese Maßnahme nun zu erheblichen Problemen in der Nachweisführung der Bauteile. Mit einer Laufzeit von fünf Jahren sind aktuell nahezu alle Prüfzeugnisse abgelaufen und können wegen des Ausschlusses auch nicht mehr verlängert werden. Ohne eine schnelle Lösung werden damit wohl in naher Zukunft die Mittel der vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBG) und Zustimmung im Einzelfall (ZiE), welche ursprünglich als in seltenen Fällen anzuwendende Nachweisformen für innovative bzw. außergewöhnliche Bauweisen vorgesehen sind, zu einem Standardnachweisverfahren mutieren müssen. Es ist zu befürchten, dass dieser Umstand zu einer hohen Belastung für die Obersten Baubehörden der Länder führt. Die Obersten Bauaufsichtsbehörden sind derzeit bemüht, dafür eine Lösung zu finden.

Grundsätzlich stellt auch die Fortschreibung der Holzbaurichtlinie, sobald sie eingeführt ist, die Grundlage für den Nachweis der Bauart nach § 85a (1) Satz 1 MBO dar (vgl. Abbildung 3).

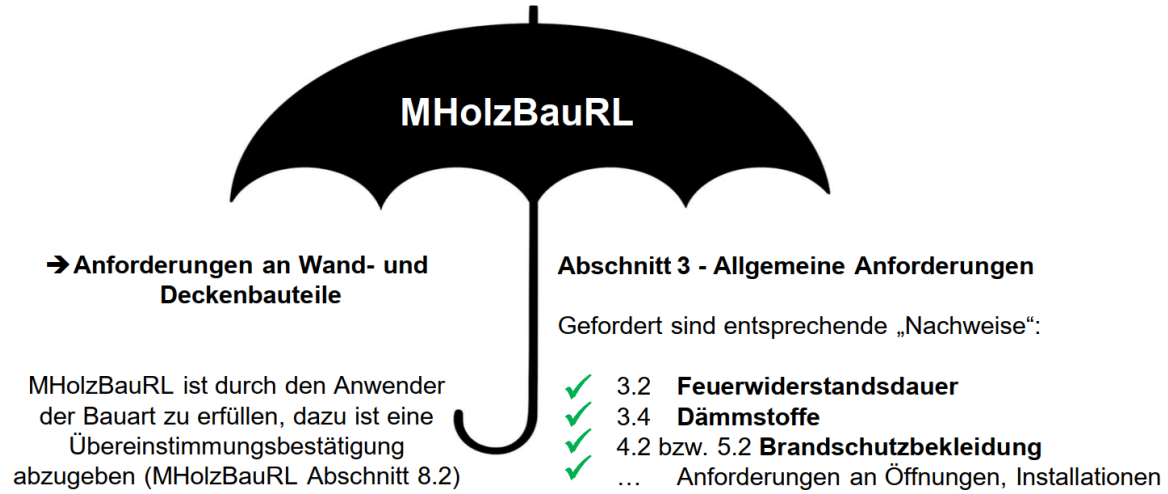


Abbildung 3: Bauteilnachweis nach Technischer Baubestimmung MHolzBauRL

Für Holzbauelemente sind die Feuerwiderstandsdauer zur Standsicherheit im Brandfall und/oder der Raumabschluss über den je nach Gebäudeklasse erforderlichen Zeitraum von 60 oder 90 Minuten sowie der ausreichende Schutzzeitraum gegen Entzündung der brennbaren Konstruktionselemente nachzuweisen.
Neben dem Nachweis über die Technische Baubestimmung, d.h. DIN EN 1995-1-2 oder DIN 4102-4, bietet die Holzbaurichtlinie die Möglichkeit des Nachweises über § 16a bzw. §16c MBO an. Der Nachweis des Raumabschlusses kann unter bestimmten Randbedingungen zudem auch vereinfacht über Vorgaben nach Anhang 1 der Holzbaurichtlinie geführt werden. Lässt man den zuletzt erwähnten vereinfachten Nachweis außer Acht, stehen damit theoretisch zunächst drei Nachweisformen zur Verfügung (Abbildung 4):

- Technische Baubestimmung – DIN EN 1995-1-2
- Allgemein bauaufsichtliches Prüfzeugnis – MVV TB C 4.1 (sofern wieder zulässig)
- Leistungsnachweis über CE-gekennzeichnetes Bauprodukt

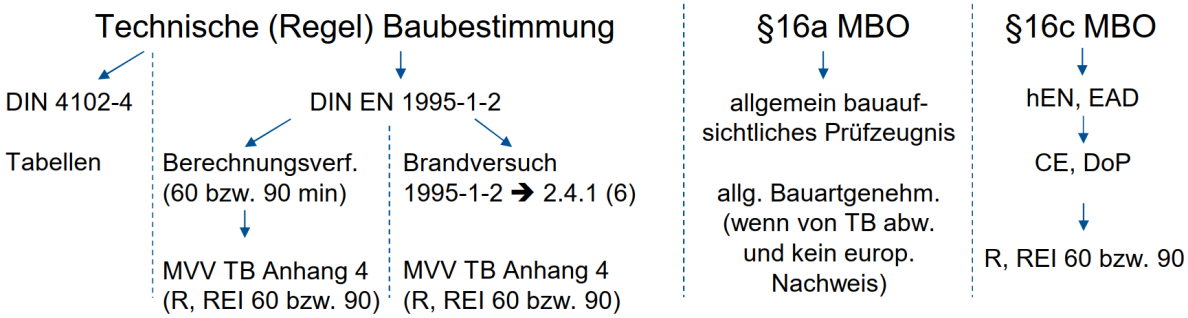


Abbildung 4: Übersicht in Diskussion befindlicher Nachweisformen zur Feuerwiderstandsdauer

Allerdings stellen sich bis auf das Europäische Bauprodukt alle anderen Nachweisformen als problembehaftet dar. Während die aktuell als Technische Baubestimmung eingeführte DIN 4102-4 nur bedingt geeignete Konstruktionen erhält (wenig Varianten und nur eingeschränkte Ausnutzungsgrade bezüglich der Standsicherheit im Brandfall) sind im Eurocode 5 die rechnerischen Nachweise überwiegend auf maximal 60 Minuten begrenzt und damit für Konstruktionen zum Einsatz in der Gebäudeklasse 5 nicht brauchbar. Eine zusätzliche Nachweisvariante über Brandversuche wird in DIN EN 1995-1-2 Abschnitt 2.4.1 (6) aufgeführt. Diese ist aus Sicht des Autors dieses Beitrages und anderen Experten bereits abschließend geregelt, da sie seitens MVV TB im Gegensatz zu anderen Bauweisen / Baustoffen nicht ausgeschlossen ist. Jedoch wird sie seitens Teile der Obersten Bauaufsichten derzeit intensiv und kritisch diskutiert. Ein Ergebnis ist noch offen.

Für den Nachweis der erforderlichen Bekleidung zum Schutz vor Entzündung der brennbaren Konstruktionsbestandteile ergibt sich ein ähnliches Bild. Hier stehen ebenfalls prinzipiell drei Möglichkeiten zur Verfügung (Abbildung 5):

- MHolzBauRL Tabellen 1 bis 5 zur Bekleidung inkl. Verbindungsmittel
- DIN EN 1995-1-2 rechnerische oder versuchstechnische Ermittlung der Leistung t_{ch}
- DIN EN 14135 [10] versuchstechnischen Ermittlung der Leistung K_2

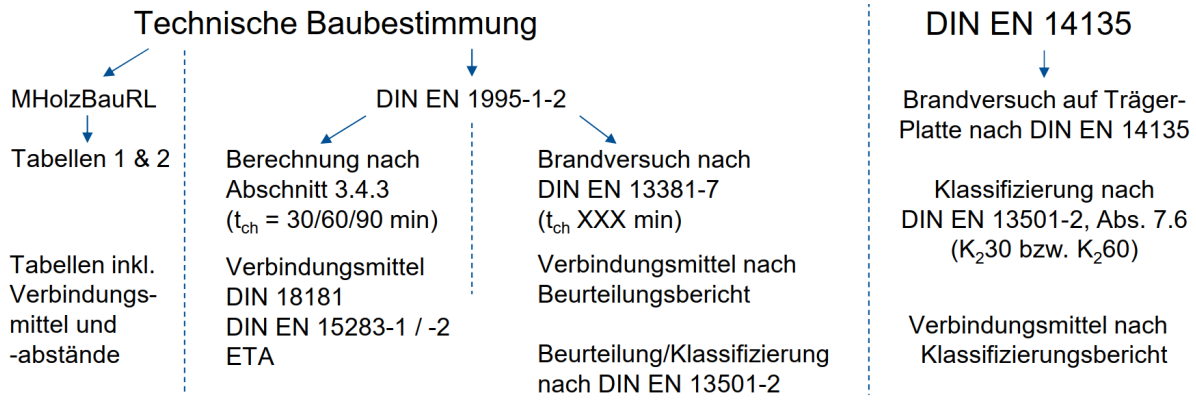


Abbildung 5: Übersicht in Diskussion befindlicher Nachweisformen zur Brandschutzbekleidung

Als Herausforderung stellt sich für die Lösung über das bauaufsichtliche Prüfzeugnis die Kombination aus einer nationalen F-Klassifizierung zum Feuerwiderstand mit der europäischen Klasse zur Brandschutzbekleidung dar. Dieser Umstand spricht für einen konsequenten Wechsel auf das europäische Klassifizierungssystem für alle nachzuweisenden Leistungen.

Bezüglich des Ansatzes der früher verwendeten K_2-Klassifizierung von Brandschutzbekleidung konnte festgestellt werden, dass diese Leistung mindestens gleichwertig zur künftigen t_{ch}-Leistung ist und deshalb bei gleicher Minutenanzahl gegen eine Anwendung kein Einwand bestehen darf (K_2 XX entspricht t_{ch} = XX min).

Welche Nachweisformen sich schlussendlich für die Festlegung in der MVV TB ergeben werden, wird sich in den kommenden Wochen zeigen. Zu hoffen bleibt aus Sicht des Autors, dass sich die Bauaufsicht weiter den europäischen Nachweismöglichkeiten öffnet.

4. Was waren die wesentlichen Grundlagen für die Fortschreibung?

Wesentliche Grundlage für die Richtlinienarbeit waren in erster Linie die zuletzt durchgeführten Forschungsvorhaben. Vorrangig ist das Projekt TIMpuls [11] zu nennen, bei dem eine Vielzahl von zuvor nur im Labormaßstab untersuchten Fragestellungen unter Realbrandbedingungen verifiziert werden konnten. Die Holzbauverbände haben mit dem sog. Eigenanteil für geförderte Forschungsvorhaben und der Bayerische Zimmererverband durch seine Vorleistung und Koordination einen sehr wichtigen Beitrag geleistet.
Darüber hinaus sei auch die «Holzbauoffensive Baden-Württemberg» genannt, die mit ihren beauftragten Forschungsvorhaben zur Entwicklung einer Richtlinie für Konstruktionen in Holzbauweise, insbesondere [12] und [13], großen Input liefern konnte.
An dieser Stelle sei nochmals Dank für das große Engagement aller Beteiligten ausgesprochen.

5. Fazit und Ausblick

Die Forschungsarbeiten und der mittlerweile dreijährige Einsatz der Projektgruppe MHolzBauRL haben sich gelohnt!
Die Fortschreibung der Richtlinie wird den mehrgeschossigen Holzbau und damit das klimagerechte Bauen wieder einen entscheidenden Schritt nach vorne bringen. Dies ist gewiss!
Die Richtlinie ist als Grundlage für alle «Holzbauer» anzusehen, da sie nicht nur die Lösungen für einen Neubau enthält, sondern auch die Vorgaben für Teilmaßnahmen, wie der Aufstockung von Gebäuden oder der energetischen Sanierung bietet.

Um das Paket vollständig umsetz- und anwendbar zu machen, werden neben der reinen Richtlinienarbeit auch die tangierenden Regelwerke, wie die relevanten Teile der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen durch die Projektgruppe mit bearbeitet. Zudem erfolgt auch parallel die Überarbeitung der Technischen Baubestimmung DIN 4102-4 als A1-Papier, sodass hier weitere Nachweismöglichkeiten für den Feuerwiderstand von Holzbauteilen zur Verfügung gestellt werden.
Bewährte Hilfestellungen für die Fachplaner sind weiterhin gültig, abschließend sei hier nochmals auf folgende Tools verwiesen:

https://www.brandschutznavigator.de

https://www.dataholz.eu

https://informationsdienst-holz.de/publikationen/leitdetails-fuer-bauteilanschluesse-gebaeudeklasse-4-und-5

6. Literaturquellen

[1] MUSTERBAUORDNUNG – MBO – Fassung November 2002, Veröffentlicht durch die Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz

[2] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise – M-HFHHolzR, Fassung Juli 2004, Veröffentlicht durch die Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz

[3] MUSTERBAUORDNUNG – MBO – Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 27.09.2019, Veröffentlicht durch die Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz

[4] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL), Fassung Oktober 2020, Veröffentlicht durch die Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz

[5] MHolzBauRL 2023, Veröffentlicht durch die Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz

[6] Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft der Leiterinnen und Leiter der Berufsfeuerwehren und des Deutschen Feuerwehrverbandes; Wirksame Löscharbeiten an Holzfassaden (2023-03)

[7] INFORMATIONSDIENST HOLZ «Leitdetails für Bauteilanschlüsse in den Gebäudeklassen 4 und 5»

[8] DIN 4102-4:2016-05 – Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile

[9] DIN EN 1995-1-2:2010-12 – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall

[10] DIN EN 14135:2004-11 – Brandschutzbekleidungen – Bestimmung der Brandschutzwirkung

[11] Engel, Thomas & Brunkhorst, Sven & Steeger, Felix & Butscher, Daniel & Kurzer, Christoph & Werther, Norman & Winter, Stefan & Zehfuß, Jochen & Kampmeier, Björn & Neske, Michael. (2022). Schlussbericht zum Verbundvorhaben TIMpuls – Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen im Hinblick auf eine erweiterte Anwendung des Holzbaus.

[12] Dederich, L., et al.: Entwicklung einer Richtlinie für Konstruktionen in Holzbauweise in den Gebäudeklassen 4 und 5 gemäß der LBO B-W (HolzbauRLBW), Rottenburg / Neckar 2020

[13] Suttner, E.; Werther, N.; Dumler, P.: Stand der Technik zur Qualität von Bauteil- und Elementfugen in Holzbaukonstruktionen im Hinblick auf den Durchtritt von Feuer und Rauch, Technische Universität München

Brandschutzkonzepte mit brennbaren Baustoffen – Die Schweiz auf dem Holzweg?

Reinhard Wiederkehr
Dipl. Holzbau-Ingenieur HTL/STV/SIA
Brandschutzexperte mit eidg. Diplom
Zimmermeister

Makiol Wiederkehr AG
Ingenieure Holzbau Brandschutz
Beinwil am See, Schweiz



Brandschutzkonzepte mit brennbaren Baustoffen – Die Schweiz auf dem Holzweg?

1. Ausgangslage

Holz als Baustoff begleitet den Menschen seit Urzeiten. Wahrscheinlich verwendete man es früher zuerst als Brennmaterial und erst später als Baustoff für Behausungen. Die sehr nützliche Eigenschaft der Brennbarkeit hat aber auch ihre Spuren hinterlassen. Gerät ein Holzbrand ausser Kontrolle, wie heute eigentlich nur noch bei Waldbränden, kann das Feuer zu einer Katastrophe führen. Früher war teilweise schon ein kleiner Brand Anlass für die Zerstörung ganzer Dörfer oder Stadtteile. Da die Leute einer solchen Feuersbrunst damals sozusagen machtlos gegenüberstanden, konnten sie oft nur ihr Leben retten.

Heute wird mit Holz anders gebaut als im Mittelalter. Die Anforderungen an Gebäude und die Infrastruktur sowie die Ausrüstung der Feuerwehren haben sich über die Jahrhunderte grundsätzlich verändert. Der Baustoff Holz als einheimischer und nachwachsender Rohstoff gewinnt in der Politik, bei Bauherren und Architekten immer mehr an Bedeutung.

Brandschutzvorschriften entstanden im Verlaufe der Jahrhunderte in verschiedenen Ländern und Gebieten meist aufgrund der Erfahrungen aus Schäden. Wie vielfältig und verschieden die Ansichten bezüglich Brandschutzvorschriften sein können, zeigt sich schon alleine darin, dass in jedem Staat in Europa eigene Brandschutzvorschriften gelten. In verschiedenen Staaten gelten sogar für einzelne Bundesländer (in der Schweiz Kantone) eigene Vorschriften. Die zugehörige technische Normung hat sich demzufolge ebenfalls unterschiedlich entwickelt.

Aufgrund seines organischen Aufbaues ist Holz brennbar. Die Prozesse wie Holz verbrennt sind ein eigentliches Naturgesetz und demzufolge weltweit gleich. In der Forschung wurde dies mehrfach untersucht und in verschiedener Fachliteratur festgehalten. Diesen Prozess hier nochmals zu beschreiben ist somit nicht nötig, da die einfache Formel, dass Holz überall gleich brennt, grundsätzlich unbestritten ist.

Es erstaunt aber trotzdem nach wie vor, wie unterschiedlich die Anwendungsmöglichkeiten von Holz als Baustoff für mehrgeschossige Gebäude in den verschiedenen Ländern und Regionen sind (Abb. 1).

Am Beispiel der Entwicklung in der Schweiz wird aufgezeigt, wie die Entstehung von holzbaufreundlichen und somit baustoffneutralen Brandschutzvorschriften über mehrere Jahrzehnte möglich ist.

Die Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF überarbeitet alle zehn Jahre die Brandschutzvorschriften. Das aktuelle VKF-Vorschriftenwerk ist seit dem 01.01.2015 [1] in der ganzen Schweiz verbindlich. In der dieser Vorschriftengeneration werden der aktuelle Stand der Technik und die sich in der Zwischenzeit weiter entwickelte europäische Normung abgebildet. Das gesellschaftlich akzeptierbare Sicherheitsniveau bezüglich des Personenschutzes wird beibehalten. Beim Sachwertschutz konnte auf der Grundlage der Ergebnisse aus dem ETH-Forschungsprojekt «Wirtschaftliche Optimierung im vorbeugenden Brandschutz» eine Reduktion des Sicherheitsniveaus und damit eine wirtschaftliche Optimierung erreicht werden. Die aktuellen VKF-Brandschutzvorschriften 2015 [1] sind unter *www.bsvonline.ch* einsehbar.

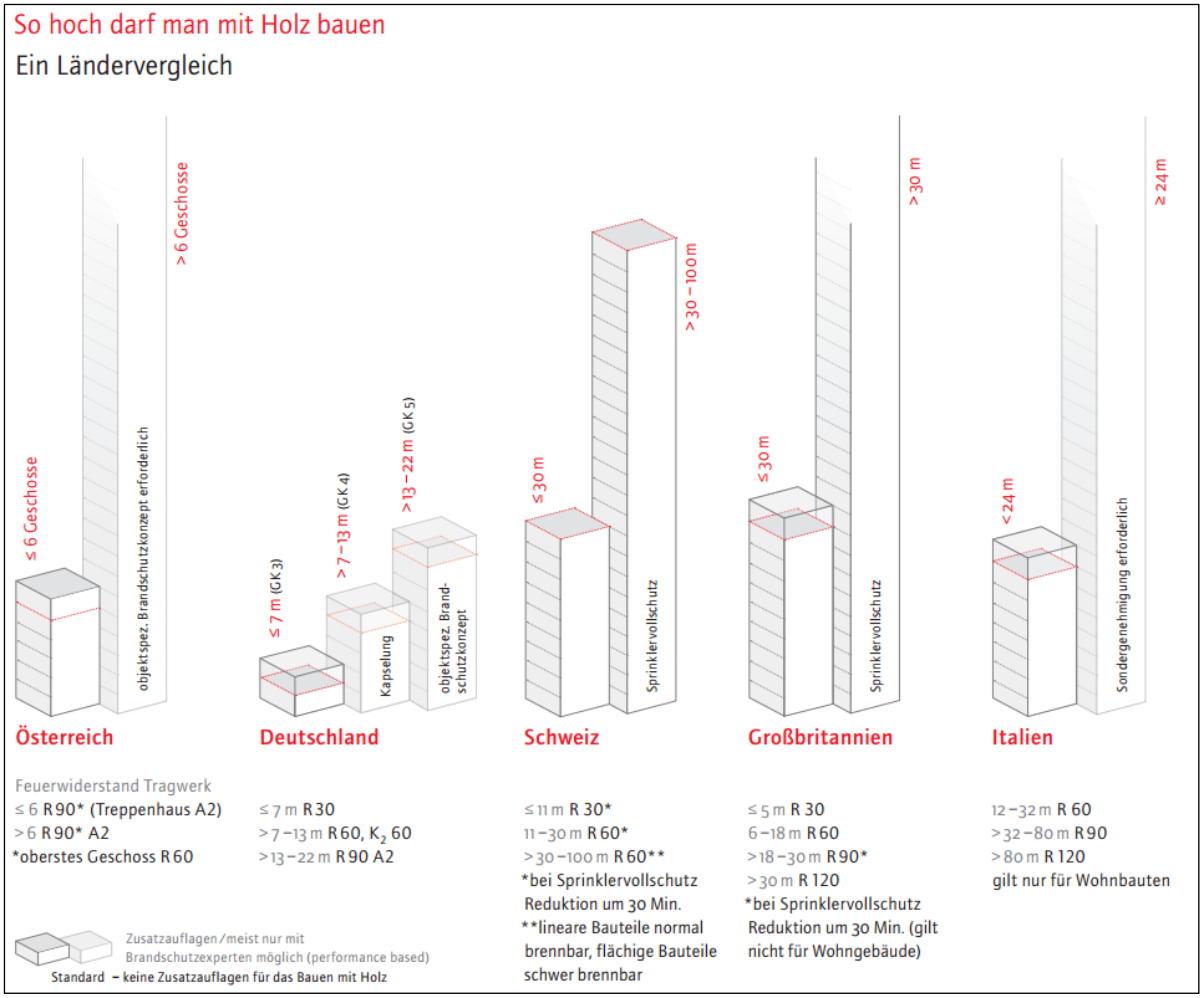
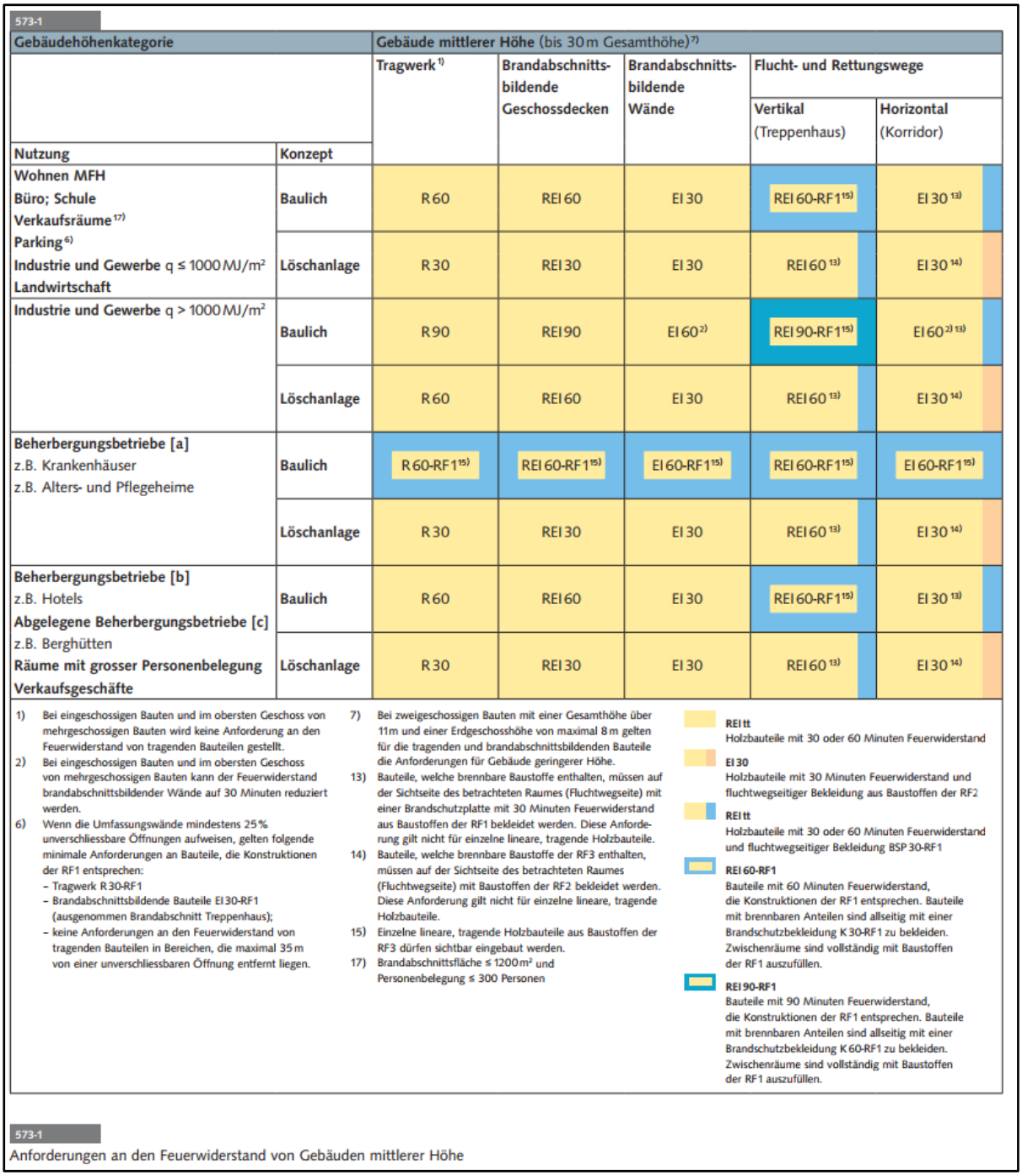


Abbildung 1: Ländervergleich für mehrgeschossigen Holzbau (Auszug aus Zuschnitt 59; 2015; Seite 16)

Die aktuellen Regelungen in der Schweiz brachten bei deren Einführung im Jahre 2015 für das Holz aufgrund der positiven Erfahrungen vorangehenden 20 Jahre bemerkenswerte Änderungen.
Brandschutztechnisch robuste Holzbauteile werden der nicht brennbaren Bauweise gleichgestellt. Auf der Grundlage des in der Brandschutznorm vorgegebenen, materialunabhängigen Sicherheitsniveaus wurde die Verwendung brennbarer Baustoffe neu geregelt und die Anwendung von Holz u.a. bei Aussenwandbekleidungen, Bedachungen und der Innenanwendung erweitert. Die Brandschutzbehörden anerkennen die Erkenntnisse aus umfangreichen Untersuchungen, die Nachweise, dass die Brennbarkeit eines Baustoffes nicht das massgebende Kriterium ist, sondern die brandschutztechnisch korrekte Ausführung einer Konstruktion einen grösseren Einfluss auf das Brandverhalten hat.
Holzbau wurde somit normal (Abb. 2).



573-1

Gebäudehöhenkategorie		Gebäude mittlerer Höhe (bis 30 m Gesamthöhe)[7]				
		Tragwerk[1]	Brandabschnitts-bildende Geschossdecken	Brandabschnitts-bildende Wände	Flucht- und Rettungswege	
					Vertikal (Treppenhaus)	Horizontal (Korridor)
Nutzung	**Konzept**					
Wohnen MFH **Büro; Schule** **Verkaufsräume**[17] **Parking**[6] **Industrie und Gewerbe** q ≤ 1000 MJ/m² **Landwirtschaft**	**Baulich**	R 60	REI 60	EI 30	REI 60-RF1[15]	EI 30[13]
	Löschanlage	R 30	REI 30	EI 30	REI 60[13]	EI 30[14]
Industrie und Gewerbe q > 1000 MJ/m²	**Baulich**	R 90	REI 90	EI 60[2]	REI 90-RF1[15]	EI 60[2] [13]
	Löschanlage	R 60	REI 60	EI 30	REI 60[13]	EI 30[14]
Beherbergungsbetriebe [a] z.B. Krankenhäuser z.B. Alters- und Pflegeheime	**Baulich**	R 60-RF1[15]	REI 60-RF1[15]	EI 60-RF1[15]	REI 60-RF1[15]	EI 60-RF1[15]
	Löschanlage	R 30	REI 30	EI 30	REI 60[13]	EI 30[14]
Beherbergungsbetriebe [b] z.B. Hotels **Abgelegene Beherbergungsbetriebe [c]** z.B. Berghütten **Räume mit grosser Personenbelegung** **Verkaufsgeschäfte**	**Baulich**	R 60	REI 60	EI 30	REI 60-RF1[15]	EI 30[13]
	Löschanlage	R 30	REI 30	EI 30	REI 60[13]	EI 30[14]

1) Bei eingeschossigen Bauten und im obersten Geschoss von mehrgeschossigen Bauten wird keine Anforderung an den Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen gestellt.
2) Bei eingeschossigen Bauten und im obersten Geschoss von mehrgeschossigen Bauten kann der Feuerwiderstand brandabschnittsbildender Wände auf 30 Minuten reduziert werden.
6) Wenn die Umfassungswände mindestens 25 % unverschliessbare Öffnungen aufweisen, gelten folgende minimale Anforderungen an Bauteile, die Konstruktionen der RF1 entsprechen:
- Tragwerk R 30-RF1
- Brandabschnittsbildende Bauteile EI 30-RF1 (ausgenommen Brandabschnitt Treppenhaus);
- keine Anforderungen an den Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen in Bereichen, die maximal 35 m von einer unverschliessbaren Öffnung entfernt liegen.

7) Bei zweigeschossigen Bauten mit einer Gesamthöhe über 11 m und einer Erdgeschosshöhe von maximal 8 m gelten für die tragenden und brandabschnittsbildenden Bauteile die Anforderungen für Gebäude geringerer Höhe.
13) Bauteile, welche brennbare Baustoffe enthalten, müssen auf der Sichtseite des betrachteten Raumes (Fluchtwegseite) mit einer Brandschutzplatte mit 30 Minuten Feuerwiderstand aus Baustoffen der RF1 bekleidet werden. Diese Anforderung gilt nicht für einzelne lineare, tragende Holzbauteile.
14) Bauteile, welche brennbare Baustoffe der RF3 enthalten, müssen auf der Sichtseite des betrachteten Raumes (Fluchtwegseite) mit Baustoffen der RF2 bekleidet werden. Diese Anforderung gilt nicht für einzelne lineare, tragende Holzbauteile.
15) Einzelne lineare, tragende Holzbauteile aus Baustoffen der RF3 dürfen sichtbar eingebaut werden.
17) Brandabschnittsfläche ≤ 1200 m² und Personenbelegung ≤ 300 Personen

REI tt
Holzbauteile mit 30 oder 60 Minuten Feuerwiderstand

EI 30
Holzbauteile mit 30 Minuten Feuerwiderstand und fluchtwegseitiger Bekleidung aus Baustoffen der RF2

REI tt
Holzbauteile mit 30 oder 60 Minuten Feuerwiderstand und fluchtwegseitiger Bekleidung BSP 30-RF1

REI 60-RF1
Bauteile mit 60 Minuten Feuerwiderstand, die Konstruktionen der RF1 entsprechen. Bauteile mit brennbaren Anteilen sind allseitig mit einer Brandschutzbekleidung K 30-RF1 zu bekleiden. Zwischenräume sind vollständig mit Baustoffen der RF1 auszufüllen.

REI 90-RF1
Bauteile mit 90 Minuten Feuerwiderstand, die Konstruktionen der RF1 entsprechen. Bauteile mit brennbaren Anteilen sind allseitig mit einer Brandschutzbekleidung K 60-RF1 zu bekleiden. Zwischenräume sind vollständig mit Baustoffen der RF1 auszufüllen.

573-1
Anforderungen an den Feuerwiderstand von Gebäuden mittlerer Höhe

Abbildung 2: Auszug aus der Lignum-Dokumentation Brandschutz [3]
Anforderungen an tragende und brandabschnittsbildende Bauteile bis zu einer Gebäudehöhe von maximal 30 m

2. Neue Brandschutzvorschriften sind wichtig für die Weiterentwicklung des Holzbaus

Die Schweizer Holzwirtschaft hat in den letzten 20 bis 30 Jahren ihre Leistungsfähigkeit unter Beweis gestellt. Mit dem mehrjährigen Programm «Brandsicherheit und Holz» konnten in breiter Abstützung technische und methodische Grundlagen sowie sichere Konstruktionen für Bauteile in Holz erarbeitet werden. Das seit längerer Zeit vorangetriebene System der Entwicklung von Musterlösungen, welche von den Behörden als «Stand der Technik» zugelassen sind und die als «Lignum-Dokumentation Brandschutz» [3, 4, 5, 6, 7] verbreitet werden, hat sich bewährt. In der ganzen Schweiz werden anspruchsvolle, grossvolumige Holzbauten unter Einhaltung hoher Qualitätssicherungsansprüche errichtet.

Dank den VKF-Brandschutzvorschriften 2003 (gültig in den Jahren 2005 bis 2014), die bereits eine Öffnung für die Holzanwendung am Bau ermöglichten, konnte sich das mehrgeschossige Bauen mit Holz stetig etablieren. Hinsichtlich Tragkonstruktionen bei Neubauten von Mehrfamilienhäusern besetzt die Holzbauweise nach wie vor erst eine Nische – sie hat aber ihren Marktanteil seit 2005 mehr als verdoppelt. Das Potenzial für den mehrgeschossigen Holzbau ist jedoch bei weitem nicht ausgeschöpft.

Die VKF hat die von der Lignum-Holzwirtschaft Schweiz eingebrachten Vorschläge zur besseren Umsetzung des Werkstoffes Holz in den heute gültigen Brandschutzvorschriften aufgenommen und den aktuellen Stand der Technik im Holzbau sowie in der Brandsicherheit dieser Bauweise berücksichtigt. Mit der VKF-Vorschriftengeneration 2015 werden bisherige Einschränkungen für die Holzanwendung beseitigt sowie die für den Holzbau teilweise komplizierten Regelungen für die Planung und Ausführung vereinfacht.

Für das Holz eröffnen sich neue Anwendungsmöglichkeiten und Vereinfachungen, die sich auf Stufe Planung und Ausführung auswirken. Es liegt nun an der Holzbranche die erweiterten Perspektiven und Massstäbe verantwortungsbewusst und qualitativ hochstehend umzusetzen.

Es war sehr erfreulich, dass mit dem ersten Hochhaus in Holzbauweise in der Schweiz in Risch Rotkreuz bereits in den Jahren 2016 bis 2018 ein Projekt realisiert wurde, welches als «normales» Standardkonzept aufgrund der aktuellen Brandschutzvorschriften mit einer Gebäudehöhe über 30 m bewilligt wurde (Abb. 3).

Das Interkantonale Organ Technische Handelshemmnisse (IOTH) hat als politische Instanz der Kantone die Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF) beauftragt, die schweizerischen Brandschutzvorschriften bis 2026 auf Basis eines risikoorientierten Ansatzes zu revidieren mit dem Ziel, eine Deregulierung, eine Vereinfachung der Vorschriften sowie einen einheitlicheren Vollzug zu erreichen. Die akzeptierten Risiken sollen weder signifikant höher noch signifikant tiefer sein als in anderen Lebensbereichen [28].
Aktuell überarbeitet die VKF die Schweizerischen Brandschutzvorschriften unter dem Projekttitel BSV 2026 [29, 30].

Die schweizerische Holzbranche bringt sich unter der Federführung der Lignum (Holzwirtschaft Schweiz) aktiv und konstruktiv kritisch in diesen Prozess (Forschung, Entwicklung, Praxisbezug, Erfahrung, Mitarbeit) ein. Es zeigt sich, dass der bisherige und in den vergangenen Jahren eingeschlagene Holzweg der Branche zu holzbaugerechten, wirtschaftlichen und brandschutztechnisch sicheren Zielen führt und nicht in einer Sackgasse mündet.



Abbildung 3: Erstes Holz-Hochhaus in der Schweiz ; Suurstoffi ; Risch Rotkreuz (Kanton Zug)

Bauherrschaft: Zug Estates AG, Zug
Architektur: Burkard Meyer Architekten BSA AG, Baden
Brandschutzkonzept: Makiol Wiederkehr AG, Ingenieure Holzbau Brandschutz, Beinwil am See
Holzbauingenieure: Erne AG Holzbau, Laufenburg
Visualisierung: Zug Estates AG, Zug
Bilder Roger Frei Zürich

3. Literatur

[1] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen, Schweizerische Brandschutzvorschriften VKF; VKF; gültig ab 01.01.2015 (Ausgabe 2017), Bern, www.bsvonline.ch

[2] SIA/Lignum Dokumentation 83, Ausgabe 1997 «Brandschutz im Holzbau»; Lignum, Zürich

[3] Lignum-Dokumentation Brandschutz, 1.1 Bauten in Holz – Brandschutz-Anforderungen, Lignum, 2017, Zürich; www.lignum.ch

[4] Lignum-Dokumentation Brandschutz, 1.2 Bauten in Holz – Verwendung von Baustoffen, Lignum, 2017, Zürich; www.lignum.ch

[5] Lignum-Dokumentation Brandschutz, 2.1 Bauen mit Holz – Qualitätssicherung und Brandschutz, Lignum, 2015, Zürich; www.lignum.ch

[6] Lignum-Dokumentation Brandschutz, 4.1 Bauteile in Holz – Decken, Wände und Bekleidungen mit Feuerwiderstand, Lignum, 2015, Zürich; www.lignum.ch

[7] Lignum-Dokumentation Brandschutz, 7.1 Aussenwände – Konstruktion und Bekleidungen, Lignum, 2009, Zürich; www.lignum.ch

[8] Wiederkehr R.: Holzbau-Beispiele in der Schweiz, 8. DGFH Brandschutztagung 1998 in Nürnberg, DGFH München

[9] Kotthoff I.: Brandausbreitung an Fassaden, Verwendung von Holz an der Aussenwand aus brandschutztechnischer Sicht, 9. DGfH-Brandschutztagung 2001, DGfH, München

[10] Wiederkehr R.: Brandschutz im mehrgeschossigen Holzbau, Brandschutzkonzepte für Holzbauten in der Schweiz, 9. DGFH Brandschutztagung 2001 in Würzburg, DGFH München

[11] Wiederkehr R., Kotthoff I.: Brandverhalten von Holzfassaden, 10. DGfH Brandschutztagung 2004 in Berlin, DGfH, München

[12] Wiederkehr R.: Brandschutzanforderungen an Holzfassaden, 36. Fortbildungskurs SAH – Gebäudehüllen in Holz, SAH, Dübendorf 2004

[13] Fontana M., Starck Ch.: Brandschutz im Holzbau – Grundlagen, Forschung und Umsetzung, 37. Fortbildungskurs SAH – Brandschutz im Holzbau, SAH, Dübendorf 2005

[14] Kotthoff I., Wiederkehr R.: Brandschutz im Holzbau, Brandsichere Anwendung von Holz an der Fassade, 10.Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen, 2004

[15] Furrer B., Kolb J., Wiederkehr R.: Neues für den Holzbau in den Schweizerischen Brandschutzvorschriften, im Schweizer Holzbau Ausgabe 2/2005; AG Verlag Hoch- und Tiefbau, Zürich

[16] Makiol + Wiederkehr; Konstruieren mit Holz 1992-2007, Lignum, Zürich 2008

[17] Makiol + Wiederkehr; Konstruieren mit Holz 1992-2012, Lignum, Zürich 2012

[18] Makiol Wiederkehr, Ingenieure Holzbau Brandschutz, Konstruktiv mit Holz 1992-2018, Lignum Zürich, 2018

[19] Wiederkehr R.: Der mehrgeschossige Holzbau – eine Schweizer Domäne, 16.Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen, 2010

[20] Starck Ch.: Holz wird normal, 20.Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen, 2014

[21] Wiederkehr R.: Brandschutz im Holzbau – Die Schweiz setzt Massstäbe, 20. Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen, 2014

[22] Wiederkehr R.: Einfach – klar – holzfreundlich; Die neuen Schweizer Brandschutzvorschriften im Innenausbau, 6. HolzBauSpezial Bauphysik, Bad Wörishofen, 2015

[23] Wiederkehr R.: Brennt Holz immer und überall (gleich)? , 8. HolzBauSpezial Bauphysik, Bad Wörishofen, 2017

[24] Wiederkehr R.: Brandschutz im Holzhochhaus am Beispiel von Suurstoffi 22, 10. HolzBauSpezial Bauphysik & Gebäudetechnik, Bad Wörishofen, 2019

[25] M-HFHHolzR: Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (Muster-Holzbaurichtlinie - M-HFHHolzR),Fassung Juli 2004

[26] OIB-Richtlinie 2: Brandschutz; Richtlinie des österreichischen Institutes für Bautechnik; Ausgabe März 2015; www.oib.or.at

[27] Zuschnitt 59: In Zukunft Stadt; Zeitschrift über Holz als Werkstoff und Werke in Holz; proHolz Austria; Wien; September 2015

[28] Diverse Autoren: Studien und Recherchen zur Totalrevision der Brandschutzvorschriften (BSV 2026), VKF, BSV 2026; Bern, www.bsvonline.ch

[29] Keel A.: Totalrevision der Brandschutzvorschriften (BSV 2026), Normkonzept; VKF, BSV 2026; September 2022, Bern, www.bsvonline.ch

[30] Engels I., Schubert M.: Totalrevision der Brandschutzvorschriften (BSV 2026), Detailkonzept für Phase 2; VKF; BSV 2026, September 2022, Bern, www.bsvonline.ch

BRAND

Bewertung und Bemessung von Holz-Bauteilen

Neue Möglichkeiten durch Bauteilkataloge im Holzbau

Dr.-Ing. Mandy Peter
bau**art** Konstruktions GmbH & Co. KG
München, Deutschland



Neue Möglichkeiten durch Bauteilkataloge im Holzbau

1. Einleitung

Holz als Baustoff erfreut sich in den letzten Jahren einer immer größer werdenden Beliebtheit, nicht nur aufgrund seiner ökologischen Nachhaltigkeit, sondern auch aufgrund seiner vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und seiner ästhetischen Qualitäten.

Um die Anwendung dieses Baustoffes in der Planung und Ausführung zu vereinfachen und somit die Wettbewerbsfähigkeit zu anderen Baustoffen zu gewährleisten, gewinnen Bauteilkataloge zunehmend an Bedeutung.

2. Bauteilkataloge für den Holzbau in Deutschland, Österreich und der Schweiz

2.1. Allgemeines

Bauteilkataloge gewinnen in Zeiten der immer komplexer werdenden Regelungswerke sowie dem stetig wachsenden Angebot an Baustoffen und Bauteilen für den Holzbau zunehmend an Bedeutung. Sie dienen Architekten, Ingenieuren und ausführenden Unternehmen als praktische Referenz, um schnell und effizient die richtigen Bauteile für ihre Holzbauprojekte auswählen zu können. Sie liefern bereits alle erforderlichen Verwendbarkeitsnachweise zur Anwendung der Baustoffe und Konstruktionen und helfen somit, die Planung und Umsetzung von Bauprojekten zu vereinfachen und Fehler zu vermeiden. Durch die strukturierte Darstellung der Informationen sind die anwenderfreundlich und unterstützen eine professionelle Ausführung von Holzbauprojekten aller Art.

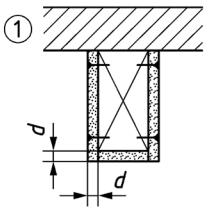
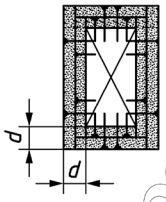
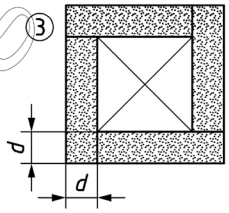
2.2. Bauteilkataloge in Deutschland

In Deutschland regelt die Normenreihe DIN 4102-4 das «Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen». Der Teil 4 beinhaltet eine Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile hinsichtlich des Brandverhaltens sowie des Feuerwiderstandes. Er ist in Form eines Bauteilkataloges aufgebaut, der neben den Angaben zum Brandverhalten der Baustoffe und der Feuerwiderstandsklassifizierung der Bauteile und Bauarten auch die Anwendungs- und Ausführungsregeln definiert. Darüber hinaus sind im Teil 4 der DIN 4102 zum Eurocode 5-1-2 ergänzende und nicht widersprechende Anwendungs- und Ausführungsregeln enthalten.

Die derzeit gültige und über die Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen unter der lfd. Nr. A 2.2.1.3 in Deutschland eingeführte Fassung der DIN 4102-4 «Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile» datiert auf 2016-05.
Da zum Einen die Anwendung dieser Norm weiter vereinfacht werden sollte und zum Anderen im Bereich des Holzbaus zwischenzeitlich eine Vielzahl zusätzlicher Bauteilprüfungen durchgeführt wurden, wurde eine Änderung A1 erarbeitet, die als Entwurf mit Ausgabedatum April 2023 veröffentlicht wurde. Zu diesem Entwurf sind ca. 700 Einsprüche eingegangen, die derzeit durch den zuständigen Normenausschuss beraten werden.

Für die klassifizierten Holzbauteile aus Voll- oder Brettschichtholz besteht die wesentliche Änderung darin, dass zukünftig für die Bekleidung zu den bislang geregelten Gipskartonfeuerschutzplatten (GKF) ebenfalls Gipsfaserplatten (GF) verwendet werden dürfen, siehe Tabelle 1. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die erforderliche Mindestdichte der Platten abweichend zum Entwurf als Ergebnis der Einsprüche auf 1.100 kg/m³ anstelle der bislang geregelten 1.000 kg/m³ erhöht wird. Darüber hinaus wurden Präzisierungen hinsichtlich der Befestigungen und konstruktiven Ausführungen vorgenommen.

Tabelle 1: E DIN 4102-4/A1:2023-04: Tabelle 8.1 – Bekleidete Holzbauteile aus Voll- oder Brettschichtholz

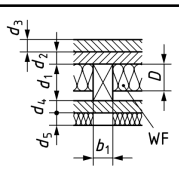
Zeile	Konstruktionsmerkmale bei			
	biege-, druck- oder zugbeanspruchten Bauteilen		druckbeanspruchten Bauteilen mit Bekleidung aus Gips-Wandbauplatten nach Zeile 1.2	
	(Beispiele für die Ausführung bei 3- oder 4-seitiger Bekleidung nach Zeilen 1.1.1 bis 1.1.5)		(Ausführung bei 4-seitiger Bekleidung)	
	1-lagige Bekleidung	2-lagige Bekleidung	1-lagige Bekleidung	
				
	Feuerschutzplatten (GKF) nach DIN 18180 in Verbindung mit Typ DF nach DIN EN 520 oder Gipsfaserplatten (GF) nach DIN EN 15283-2 (Rohdichte ≥ 1 000 kg/m³) mit geschlossener Fläche (Zeile 1.1.1), Holzwerkstoffplatten oder Bretter (Zeilen 1.1.2 bis 1.1.5)		**Feuerwiderstandsklasse-Benennung**	
			F 30-B	**F 60-B**
1	Mindestdicke *d* der Bekleidung bei		—	—
1.1	Balken, Stützen und Zuggliedern (Ausführungs-Schemaskizzen 1 und 2) bei Verwendung von		—	—
1.1.1	Feuerschutzplatten (GKF) oder Gipsfaserplatten (GF)	mm	12,5	2 × 12,5
1.1.2	Furniersperrholz nach DIN EN 13986 in Verbindung mit DIN EN 636 und DIN 20000-1 aus Holzarten außer Buche	mm	19	—
1.1.3	Furniersperrholz nach DIN EN 13986 in Verbindung mit DIN EN 636 und DIN 20000-1 aus Buche	mm	15	—
1.1.4	Spanplatten oder OSB nach DIN EN 13986 in Verbindung mit DIN EN 312 bzw. DIN EN 300 und DIN 20000-1[a]	mm	19	—
1.1.5	gespundeten Brettern aus Nadelholz nach DIN 4072	mm	24	—
1.2	Stützen (Ausführungs-Schemaskizze 3) bei Verwendung von Gips-Wandbauplatten nach DIN EN 12859 mit Rohdichten von $\rho \geq 600$ kg/m³	mm	50	50

[a] Bei schwerentflammbaren Holzwerkstoffplatten darf die Mindestdicke um 10 % verringert werden.

Der Abschnitt 10 «Wand-, Dach- und Deckenbauteile im Holzbau und Ausbau» wurde inhaltlich vollständig überarbeitet und wird somit den bisherigen Abschnitt der Ausgabe 2016 ersetzen. Die Abschnitte 10.3 bis 10.5 widmen sich den klassifizierten Wänden, Decken und Dächern im Holzbau. Die neuen Inhalte tragen insbesondere den neuen Entwicklungen und Bedürfnissen des modernen Holzbaus Rechnung. Für tragende, raumabschließende Wände, Decken und Dächer wird es demnach Nachweise bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten geben, die Möglichkeiten für den modernen mehrgeschossigen Holzbau bieten, Tabelle 2.

Nur für die Normungsarbeit

Tabelle 2: E DIN 4102-4/A1:2023-04: Tabelle 10.25 – Tragende raumabschließende Außenwände in Holztafelbauart F 90-B mit Dämmschicht aus Holzfaser

Zeile	Konstruktionsmerkmale	Holzrippen nach 10.3.2.2 Mindestmaß $b_1 \times d_1$ [mm], α_7 nach Gleichung (10.1)	Innen-Bekleidung(en) oder -Bekleidung(en) nach 10.3.1.3 aus Feuerschutzplatten (GKF) oder Gipsfaserplatten (GF)		Dämmschicht nach 10.3.1.4 aus Holzfaser (WF) [c]		Außen- Bekleidung oder -Bekleidung nach 10.3.1.3 aus			
			Mindestdicke		Mindest-		Holzfaser-dämmplatte (WF)	Putz	Brettern oder Holzwerkstoff-platten mit $\rho = 600$ kg/m³	Feuerschutz- (GKF) oder Gipsfaser-platten (GF)
					dicke	rohdichte			Mindestdicke	
			d_2	d_3	D	ρ	$d_4/(\rho)$	d	d_4	d_4
			mm	mm	mm	kg/m³	mm/(kg/m³)	mm	mm	mm
1		60×160[b] $\alpha_7 \leq 1{,}0$	18	18	160	50	40/(260)	5[a]	15	—
2			18	18	160	50	40/(260)	5[a]	—	12,5
3			18	18	160	50	60/(260)	5[a]	—	—

[a] Brandschutztechnische Mindestputzdicke; der Putz muss DIN EN 998-1 in Verbindung mit DIN EN 13914-1 und DIN 18550-1 entsprechen.
[b] Bei nichttragenden Wänden darf b_1 auf bis zu 40 mm reduziert werden.
[c] Bei Teildämmung ist 10.3.1.4 (6) zu berücksichtigen.

Es wurde zudem eine Vielzahl neuer Produkte aufgenommen, zu denen beispielsweise Massivholz, Zellulose, Holzweichfaser und Gipsfaserplatten zählen.

Tabelle 3: E DIN 4102-4/A1:2023-04: Tabelle 10.30 – Nichttragende, raumabschließende Wände aus Massivholzelementen

Zeile	Beidseitige Bekleidung Mindestdicke von Feuerschutzplatten (GKF) oder Gipsfaserplatten (GF)		Mindest-dicke Massivholz-elemente[a]	Feuer-wider-stands-klasse-Benennung
	1. Bekleidungslage Dicke	2. Bekleidungslage Dicke		
	mm	mm	mm	
1	—	—	80[b]	F 30-B
2			120[b]	F 60-B
3	12,5	—	50	F 30-B
4			110	F 60-B
5			150	F 90-B
6	15	—	40	F 30-B
7			100	F 60-B
8			140	F 90-B
9	18	—	90	F 60-B
10			130	F 90-B
11	12,5	12,5	60	F 60-B
12			110	F 90-B

ANMERKUNG 1 Durch die Anordnung zusätzlicher Bekleidungen wird der Feuerwiderstand nicht negativ beeinflusst.
ANMERKUNG 2 Sofern Anforderungen an die Tragfähigkeit gestellt werden, sind gesonderte Nachweise zu führen.

[a] Nach 10.3.5.1.
[b] Bei mechanisch verbundenen Massivholzelementen ist zur Verhinderung von Konvektionsströmen beidseitig eine Bekleidung nach 10.3.1.3 anzuordnen.

Nur für die Normungsarbeit

Erweiterte Regeln zur konstruktiven Ausführung sowie eine Vielzahl neuer Fügungs- und Anschlussdetails sollen die Umsetzung vereinfachen und Planungs- und Ausführungssicherheit schaffen.

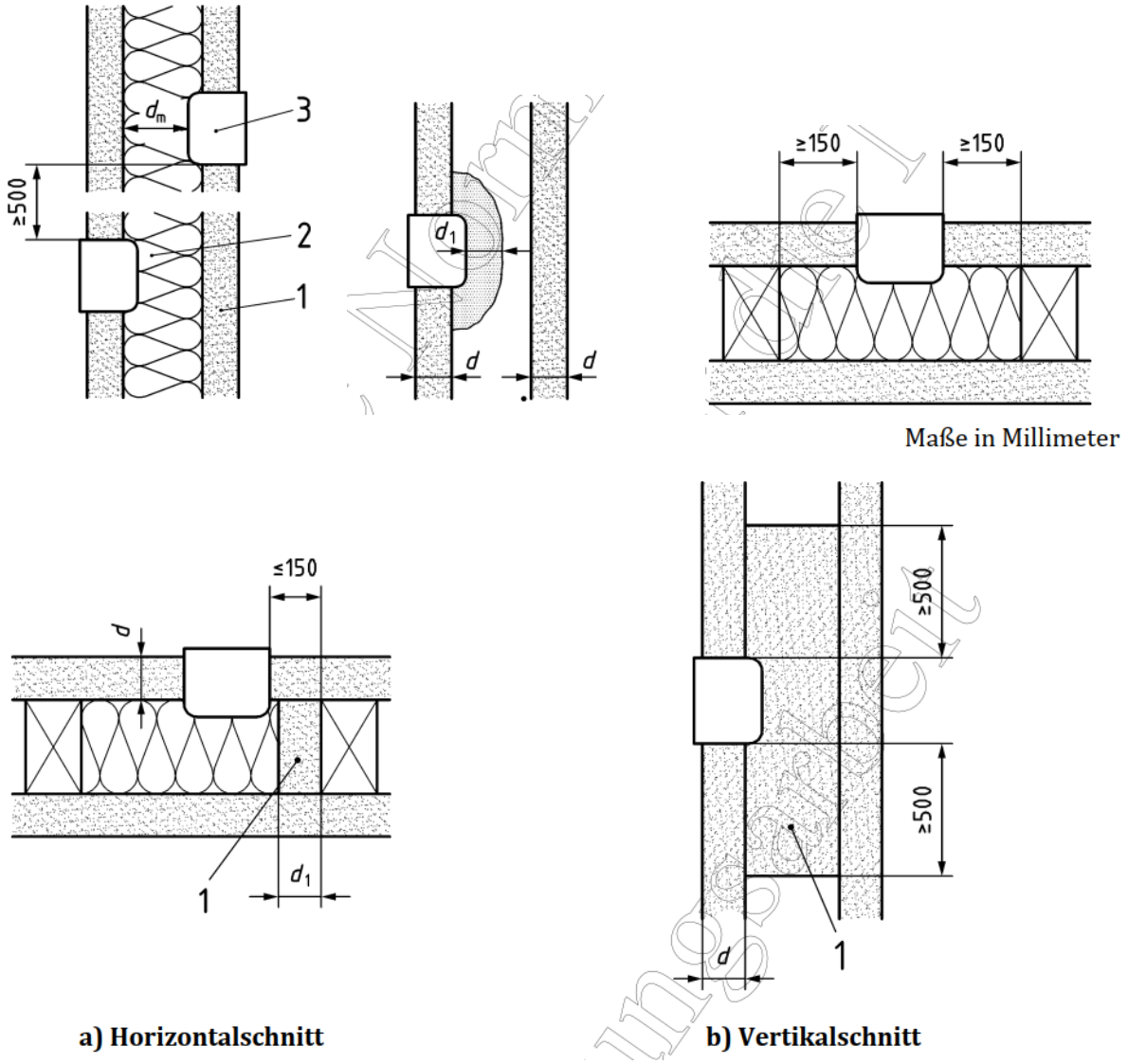


Abbildung 1: Beispiele für Einbauten nach E DIN 4102-4/A1:2023-04

Neben der DIN 4102-4 stellt die Bauteildatenbank «dataholz.eu» für den deutschen Markt einen Bauteilkatalog zur Verfügung, mit dem übersichtlich und schnell passende Bauteilaufbauten mit den entsprechend hinterlegten Verwendbarkeitsnachweisen ermittelt werden können.

2.3. Bauteilkataloge in Österreich und der Schweiz

In Österreich steht, ebenso wie in Deutschland, mit der Website «dataholz.eu» ein umfangreicher Bauteilkatalog für den Holzbau zur Verfügung. Er enthält eine Sammlung von Datenblättern für Holz- und Holzwerkstoffe, Baustoffe, Bauteile und Bauteilfügungen für den Holzbau. Alle Informationen der Plattform basieren auf Angaben akkreditierter Prüfanstalten oder anerkannter Forschungseinrichtungen. Prüfungen, Berechnungen und Beurteilungen basieren jeweils auf den aktuell gültigen Normen. Es werden für die einzelnen Aufbauten jeweils alle Kenndaten zum Brandschutz, zum Wärmeschutz sowie zum Schallschutz angegeben.

Für die Schweiz steht mit der Plattform «lignumdata.ch» ein ähnliches Werkzeug zur Verfügung. Auch hier können schnell und einfach Informationen zu Baustoffen und Bauteilen für den Holzbau ermittelt werden. Für die jeweiligen Bauteilaufbauten sind neben den

Angaben zum Brandschutz auch alle erforderlichen Kennwerte zum Wärme- und Schallschutz angegeben. Über Filterfunktionen lassen sich effizient für das jeweilige Vorhaben und die gestellten Anforderungen die passenden Aufbauten herausfiltern.
Die Lignum stellt dabei alle Daten über eine API-Schnittstelle bereit, sodass diese auch für die digitale Beschreibung von Gebäudemodellen in der BIM-Methode verwendet werden können.

3. Fazit

Die Fortschreibung der DIN 4102-4 mit dem Teil A1 bringt deutliche Weiterentwicklungen für den Nachweis von Holzbauteilen und -konstruktionen im Brandfall. Insbesondere durch die Aufnahme neuer Produkte sowie der Erweiterung der Feuerwiderstandsklassifikationen auf 60 und 90 Minuten stehen für Deutschland zukünftig Konstruktionen zur Verfügung, die im modernen, mehrgeschossigen Holzbau eingesetzt werden können.

Mit den Bauteilkatalogen der Online-Plattformen «dataholz.eu» und «lignumdata.ch» stehen für Architekten, Ingenieure und ausführende Unternehmen in Deutschland, Österreich und der Schweiz insgesamt wertvolle Werkzeuge zur Verfügung, um für den jeweiligen Einsatzfall effizient und praxisgerecht Baustoffe und Bauarten auswählen zu können, die neben den Brandschutzanforderungen auch alle erforderlichen Anforderungen an den Wärme- und Schallschutz erfüllen. Um diese Kataloge aktuell zu halten und der ständigen Weiterentwicklung Rechnung zu tragen, ist eine Pflege und Fortschreibung notwendig, bei der insbesondere die Unterstützung der Industrie durch Bereitstellung der jeweiligen Daten wesentlich ist.

Holzbauteile im Bestand – Konzepte und Ideen zur Ausführung

Hanspeter Kolb
Berner Fachhochschule
Holzbauexperten GmbH
Biel/Bienne, Schweiz



Holzbauteile im Bestand – Konzepte und Ideen zur Ausführung

1. Einführung

Klimaschutz, Nachverdichtung und Ressourcenverbrauch sprechen dafür, dass wir in Zukunft vermehrt vom Neubau abkommen werden. Wir müssen uns in wachsendem Masse damit auseinandersetzen, wie wir den bestehenden Gebäudepark erhalten, erneuern, dessen Lebensdauer verlängern und an die heutigen Bedürfnisse der Nutzer und Vorgaben von Baugesetzen anpassen können. Nebst der Energieeffizienz spielt dabei die Gebäudesicherheit eine zentrale Rolle und somit stellt sich die Frage, wie weit wir bestehende Bauten an heutige Brandschutzvorschriften anpassen müssen.

Beim Bauen im Bestand wird dabei die Frage des Bestandsschutzes zentral. Das heisst, wie weit ein (vor Jahren) rechtmässig erstelltes Bauwerk «rechtswidrig» wird, weil es den aktuellen Bauvorschriften nicht entspricht.

Als Grundsatz gilt: Wurde ein Gebäude auf Basis einer rechtmässigen Baugenehmigung erstellt, geniesst es Bestandsschutz. Eine Anpassung an heutige Vorschriften ist nicht erforderlich. Ist jedoch die Personensicherheit nicht gewährleistet oder sind wesentliche Nutzungsänderungen oder Erweiterungen (z.B. Aufstockungen) vorgesehen, sind verhältnismässige Anpassungen an die aktuellen Brandschutzvorschriften erforderlich.

Dieser Grundsatz gilt trotz unterschiedlichen Brandschutzvorschriften in seinen Grundsätzen sowohl in Deutschland, Österreich wie auch in der Schweiz.
Somit ist es unerlässlich, bereits in einer ersten Phase eines Bauprojektes im Bestand abzuklären, ob Bestandsschutz geltend gemacht werden kann oder nicht. Dazu macht es Sinn, sehr früh entsprechende Abklärungen mit den Brandschutzbehörden zu tätigen und einen erfahrenen Brandschutzplaner beizuziehen. Allgemeine Festlegen sind nicht möglich. Es braucht eine individuelle bzw. objektbezogene brandschutztechnische Beurteilung des Objekts bzw. des Bauvorhabens in Abhängigkeit der Gesetzeslage bei dessen Erstellung, der Einhaltung der Schutzziele und der geplanten Umbau-, Ausbau oder Erweiterungsmassnahmen.

2. Beispiele Bestandsschutz ja/nein

Ein Bürogebäude (Baujahr 1972) mit 6 Geschossen wird energie- und schallschutztechnisch saniert. Grössere geometrische Anpassungen von Räumen sind nicht vorgesehen. Da die Nutzung «Büro» nicht verändert wird und auch die Personenzahl gleich bleibt, gilt der Bestandschutz, vorausgesetzt die Brandschutzvorschriften zum Zeitpunkt der Erstellung sind eingehalten. Ist die Personensicherheit jedoch nicht gewährleistet, z.B. durch ungenügende (veränderte) Fluchtwege, kann Bestandschutz nicht mehr geltend gemacht werden. Eine Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der bestehenden brandschutztechnischer Anlagen ist auf jeden Fall erforderlich (Unterhalts- bzw. Instandhaltungspflicht).

Die Bauherrschaft des oben erwähnten Bürogebäudes liebäugelt mit dem Einbau mehrerer Schulungsräume im 1. und 2. Obergeschoss. Die Schulungsräume sollen fremdvermietet und flexibel nutzbar sein, das heisst mehrere Räume im 2. OG sollen «zusammengeschaltet» werden können, um einen grossen Versammlungsraum mit einer Personenbelegung von maximal 150 Personen zu erhalten.
In diesem Fall wird die Nutzung verändert, insbesondere muss die Personensicherheit gewährleistet werden. Die Schweizerischen Brandschutzvorschiften, verlangen ab einer Belegung (eines Raumes) von mehr als 100 Personen in Obergeschossen zwei unabhängige vertikale Fluchtwege (Treppenhäuser). Ist dies nicht der Fall, ist eine Nachrüstung zwingend. Der Bestandsschutz kann zumindest für diesen Bereich nicht geltend gemacht werden.

Anmerkung: Aus wirtschaftlichen Gründen könnte es sinnvoll sein, den Versammlungsraum ins Erdgeschoss zu verlegen und Notausausgänge direkt ins Freie zu realisieren. Ein zusätzlicher vertikaler Fluchtweg (Treppenhaus) könnte so vermieden werden.

Bei einem 3-geschossigen Wohnhaus soll eine Aufstockung realisiert werden (Baujahr 1850; Gebäudehöhe 10.50; Mischbauweise: Wände: Backstein, Geschossdecken: Holzbalkendecken bekleidet; 6 Wohnungen, je 3 links und rechts des Treppenhauses, Treppenlauf und Podeste aus Eichenholz, Breite 1.10 m; Aufstockung: 1 Attikawohnung mit Dachterrasse). Durch die Aufstockung ändert sich die Gebäudekategorie (CH: geringe Höhe zu mittlerer Höhe) und der Feuerwiderstand erhöht sich von 30 auf 60 Minuten (Tragwerk, Geschossdecken und Brandabschnitt Treppenhaus). Zudem entsprechen die Breite der Podeste und der Treppenläufe sowie deren Materialisierung nicht den heutigen Brandschutzvorschriften (in der Schweiz). Grundsätzlich kann der Bestandsschutz nicht mehr geltend gemacht werden. Die Brandschutzmassnahmen sind verhältnismässig an die aktuellen Brandschutzvorschriften anzupassen. Was unter «verhältnismässig» zu verstehen ist, muss mit den Brandschutzbehörden frühzeitig geklärt werden. So lässt sich z.B. die Geometrie des Treppenläufe und Podeste vermutlich nicht so einfach anpassen (B = 1.10 anstelle von 1.20), die Materialisierung jedoch schon. Somit könnte das Schutzziel «sichere Flucht- und Rettungswege» trotz fehlender 10 cm Breite erreicht werden. Auch eine Ertüchtigung der Wohnungseingangstüren und allenfalls der Geschossdecken ist zu diskutieren. Hier ist zudem zu berücksichtigen, dass auch Vorgaben des Schallschutzes eine Ertüchtigung erforderlich machen können und Synergien zwischen Schall- und Brandschutz genutzt werden sollten.

3. Verhältnismässigkeit

Grundsätzlich gelten die aktuellen Brandschutzvorschriften für Neubauten. Bestehenden Objekten (bei denen der Bestandschutz nicht geltend gemacht werden kann) sind jedoch verhältnismässig an die aktuell geltenden Brandschutzvorschriften anzupassen, wenn (VKF-Brandschutznorm 2025, Art. 2 «Geltungsbereich» [1]):

- wesentliche bauliche oder betriebliche Veränderungen, Erweiterungen oder Nutzungsänderungen vorgenommen werden
- die Gefahr für Personen besonders gross ist

Ob einer oder beide dieser Punkte zutreffen, ist nicht in jedem Fall klar und muss frühzeitig mit der Brandschutzbehörde geklärt werden. Zudem muss der Aufwand für erforderliche Massnahmen und die damit erreichbare Verminderung von Gefahren in einem angemessenen Verhältnis stehen. Der Schutzaufwand sollte in einem vernünftigen Verhältnis zu dem im Brandfall zu erwartenden Nutzen stehen. Die zu ergreifende Schutzmassnahme muss geeignet, erforderlich und zumutbar sein.
Es wird schnell klar, dass in der Praxis nicht alle Beteiligten die gleiche Sichtweise und somit das gleiche Verständnis für die Verhältnismässigkeit haben können. Es führt auch hier kein Weg an einer gemeinsamen Lösungssuche vorbei. Dazu muss bei allen Beteiligten ein gewisse Bereitschaft für Kompromisse vorhanden sein.

4. Vorgehen

Bauen im Bestand erfordert somit einiges an Flexibilität aller Beteiligten. Bauherrschaft und Behörden müssen auf Kompromiss-Vorschläge der Planenden, in diesem Fall der «Fachplanenden Brandschutz» eingehen können. An die Fachkompetenzen der Brandschutzspezialisten werden hohe Anforderungen gestellt, lassen sich die in Gesetzen, Normen und Vorschriften festgeschriebenen Brandschutzanforderungen nicht einfach im Massstab 1:1 umsetzen.
In Abbildung 1 sind die wichtigsten Schritte im Bauprozess schematisch erfasst. Parallel dazu ist in Stichworten beschrieben, wie die Brandschutzmassnahmen umgesetzt werden können.
Die meisten dieser Aufgaben sind, unabhängig vom Brandschutz, ohnehin bei jedem Bauvorhaben notwendig. Die Reihenfolge des einzelnen Schritte kann dabei objektbezogen unterschiedlich sein.

Für die Fachplanenden Brandschutz geht es dabei nicht nur um das reine Umsetzen der Brandschutzvorschriften, sondern auch um der Kommunikation bzw. das Erklären deren Auswirkungen und Bedeutung gegenüber den Bauherrschaften und den Gesamtplanenden. Diese müssen die vorgesehenen Massnahmen verstehen. Sie sollten wissen, was allfällige Entscheide für Nutzungseinschränkungen (z.B. grosse Flächen für vertikale Fluchtwege) im alltäglichen Betrieb eines Gebäudes auslösen könnten.

Schritt	**Aufgabe**
Start	
Projektdefinition	Formulierung des Projektziels Generelle Definition der zukünftigen Nutzung
Projektorganisation	Bestimmung/Beauftragung Gesamtleiter, Fachplaner Brandschutz In der Schweiz zudem: QS-Verantwortlicher Brandschutz Ev. erste Kontaktaufnahme mit Behörden (Denkmalpflege / Brandschutz)
Bestandsaufnahme	Zustandserfassung der vorhandenen Brandschutzmassnahmen (baulich, technisch, organisatorisch)
Anfrage / Abklärung (1)	Generelle Klärung Bestandsschutz ja/nein Grundsätzliche Abklärungen mit Behörden zu den notwendigen Massnahmen bezüglich des Brandschutzes
Projektkonzept	Zuordnung der detaillierten Nutzungen Definitive Festlegung der Schutzziele und des Schutzkonzeptes Vergleich IST - SOLL
Vorprojekt	Erarbeitung des Vorprojekts mit Konstruktions- und Baustoffkonzept Erarbeitung des Qualitätssicherungskonzept (CH) Erarbeiten des Vorprojekts Brandschutz (Entwurf Brandschutzkonzept und -pläne)
Anfrage / Abklärung (2)	Besprechung des Brandschutzkonzeptes bzw. der Brandschutzpläne (Entwurf) mit den Behörden
Bauprojekt	Erarbeiten des vollständigen Bauprojekts Erstellen des definitiven Brandschutzkonzeptes bzw. der definitiven Brandschutzpläne Ausarbeitung des Brandschutzkonzeptes für die Bauphase (ev. Genehmigung durch Behörde)
Baugesuch	Einreichen des Baugesuches mit den erforderlichen brandschutztechnischen Unterlagen
Baubewilligung mit Auflagen	Prüfung und Bewilligung durch Behörden Festlegung der Qualitätssicherungsstufe (CH) Definitive Vorgabe der Brandschutzauflagen (Verfügung Brandschutz)
Ausführungsplanung	Erarbeitung der Bauteilkonstruktion und Detaillösungen Erbringen der brandschutztechnischen Nachweise Ausarbeitung des Kontrollplanes Brandschutz
Realisierung	Fachgerechte Ausführung unter Berücksichtigung des Brandschutzkonzeptes Umsetzung Brandschutz und auf der Baustelle Kontrolle der Ausführung (Fachplaner, QS-Verantwortliche) Schlussabnahme Instruktion von Mieter und Nutzerschaft Übergabe an Mieter, Nutzer und Bauherrschaft Dokumentation für Revision und Unterhalt
Bewirtschaftung	Periodische Kontrolle der Brandschutzmassnahmen Wartung, Unterhalt und Instandhaltung der brandschutztechnischen Anlagen, insbesondere der Haustechnik
Rückbau	Brandschutz- und Sicherheitskonzept für den Rückbau Fachgerechte Wiederverwertung oder Entsorgung

Abbildung 1: Brandschutz (im Bestand) im Bauprozess

5. Bestandsaufnahme

Ein umfassende brandschutztechnische Bestandaufnahme ist für die weitere Planung bei Bauten im Bestand unumgänglich. Diese sollte zu eine möglichst frühen Zeitpunkt stattfinden und folgende Punkte umfassen:

- Generelle Kennwerte des Gebäudes (Baujahr, Bauweise, Nutzungen usw.)
- Geometrische Gegebenheiten (Gebäudehöhe, Geschossflächen, Fluchtwege; Brandabschnitte usw.)
- Baulicher Brandschutz (Tragwerk, brandabschnittsbildende Bauteile; Baustoffe)
- Technischer Brandschutz (Löscheinrichtungen, BMA, RWA, Blitzschutz usw.)
- Haustechnik (wärme- und lufttechnische, elektrische Anlagen, Abschottungen usw.)
- gefährliche Stoffe (Verwendung, Lagerung usw.)
- organisatorischer Brandschutz (Sicherheitsorganisation, SiBe usw.)
- abwehrender Brandschutz (Feuerwehr, Zugänglichkeit, Löschwasser usw.)

Es ist im Rahmen dieses Vortrages nicht möglich, detailliert auf all diese Punkte einzugehen. Weitere Informationen und Planungshilfsmittel sind im Kapitel 11 «Literatur» aufgeführt.

5.1. Beurteilung bestehender Bauteile

Die brandschutztechnische Leistungsfähigkeit einzelner Bauteile wird anhand ihrer Feuerwiderstandsfähigkeit und dem Brandverhalten ihrer Baustoffe eingeordnet.

Der Feuerwiderstand bestehender (brandabschnittsbildender) Bauteile kann oft mit Hilfe der nachfolgend aufgeführten Dokumente abgeschätzt werden. In diesen Dokumenten sind Bauteile (Wände, Decken) auf Basis durchgeführter Versuche, Berechnungen oder Erfahrungen katalogisiert und können ohne weitere Nachweise klassifiziert werden.

- DIN 4102-4:2016-05 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen [2]
- Lignum-Dokumentation Brandschutz, Publikation 4.1 Bauteile in Holz – Decken, Wände und Bekleidungen mit Feuerwiderstand [3]
- Lignum-Dokumentation Brandschutz, Publikation 8.1 Abschlüsse – Fenster-, Tür- und Trennwandsystem [4], Kapitel 10: Brandschutztüren im Bestand
- Holz-Brandschutz Handbuch [5]

Der Feuerwiderstand bestehender Tragwerke und brandabschnittsbildender Bauteile kann auch mit Hilfe anerkannter Berechnungsverfahren ermittelt werden:

- Lignum-Dokumentation Brandschutz, Publikation 3.1 Feuerwiderstandbemessung – Bauteile und Verbindungen [6]
- EN-Norm 1995-1-2: Eurocode 5: Holzbauten: Tragwerksbemessung für den Brandfall [7]

Aus Gründen der Vereinfachung wird in den nachfolgenden Ausführungen mehrheitlich nur noch auf die Lignum-Dokumentation Brandschutz verwiesen.

6. Schutzziele und Brandschutzkonzepte

Bauten und Anlagen sind so zu erstellen, zu **betreiben und instand zu halten**, dass

- die Sicherheit von Personen und Tieren gewährleistet ist;
- der Entstehung von Bränden und Explosionen vorgebeugt und die Ausbreitung von Flammen, Hitze und Rauch begrenzt wird;
- die Ausbreitung von Feuer auf benachbarte Bauten und Anlagen begrenzt wird;
- die Tragfähigkeit während eines bestimmten Zeitraums erhalten bleibt;
- eine wirksame Brandbekämpfung vorgenommen werden kann und die Sicherheit der Rettungskräfte gewährleistet ist.

Die Schutzziele können mit unterschiedlichen Konzepten erreicht werden (Abb. 2) bei denen die grundlegenden Elemente des Brandschutzes (baulich, technisch, organisatorisch) unterschiedlich gewichtet werden. Da beim Bauen im Bestand diverse Sachzwänge

vorliegen, ist die Anwendung von Standardkonzepten eher selten möglich. Vielmehr sind objektbezogene Konzepte erforderlich, welche einiges an Sachverstand der Beteiligten erfordert.

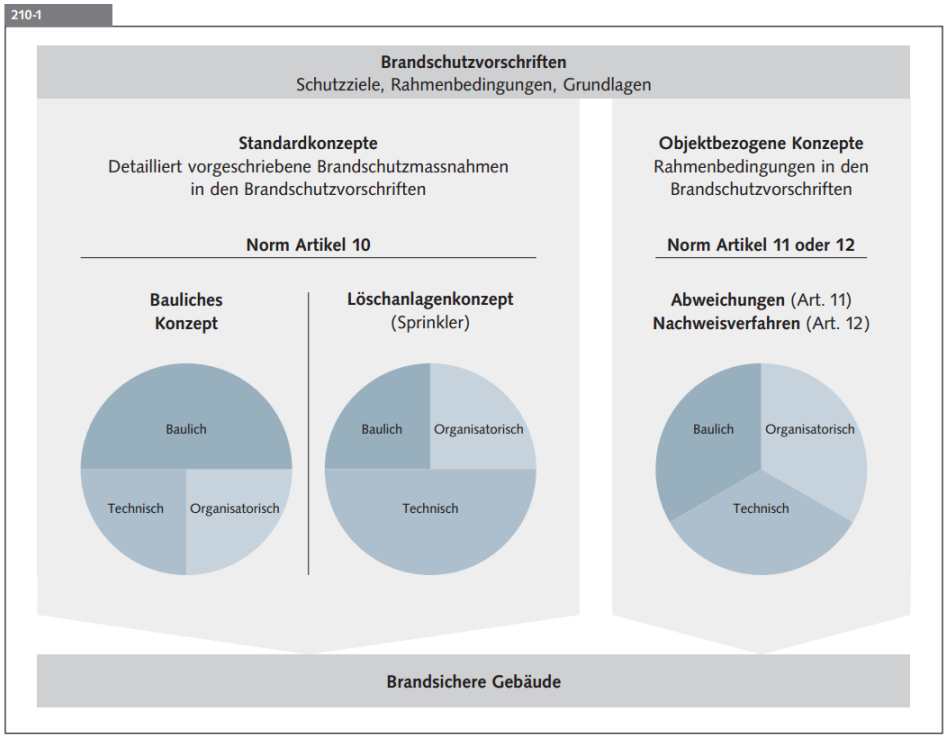


Abbildung 2: Brandschutzkonzepte gemäss VKF-BSN 10-15
Quelle: Lignum-Dokumentation Brandschutz [9]

6.1. Stolpersteine

Bestehende Bauten weichen oft von den heutigen brandschutzrechtlichen Vorgaben ab, gelten aber zumeist als ausreichend sicher. Mit einer sinnvollen Brandschutzplanung können trotz wesentlicher Änderungen überflüssige und teure Brandschutzmassnahmen vermieden werden. Stolpersteine können sein:

- Zu späte Beachtung des Brandschutzes in der Projektierung
- Zu späte Kontaktaufnahme mit der Brandschutzbehörde
- Mangelhafte und nicht komplette Bestandsaufnahme
- Brandschutztechnisch nicht korrekte Zustände bei Bestandesbauten durch frühere Umbauten oder (ursprünglich) nicht vorgesehene Nutzungen von Räumen
- Fehlende konkrete Vorschläge im Rahmen der Erarbeitung des Brandschutzkonzeptes von den Brandschutzplanenden (die Behörden fragen, was zu tun ist)
- Brandschutzkonzepte bzw. Verfügungen der Brandschutzbehörden lassen sich nicht oder nur schwer umsetzen (Brandschutz wird zum Verhinderer, siehe Bemerkung unter Kapitel 4).

6.2. Schwerpunkte

Mit ausgewogenen Brandschutzkonzepten und frühzeitigem Einbezug der Behörden (Abb. 1) lassen sich die oben erwähnten Stolpersteine oft eliminieren. Im Vordergrund stehen dabei:

- Sichere Flucht- und Rettungswege
- Geltendmachung technischer Brandschutzmassnahmen als Kompensation
- Feuerwiderstand von tragenden und brandabschnittsbildenden Bauteilen
- Haustechnik
- Verwendung von Baustoffen
- Anschlüsse und Hohlräume

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf die ersten drei Punkte.

7. Sichere Fluchtwege

Bei einem Brandereignis ist die sichere Nutzung der vertikalen und horizontalen Fluchtwege entscheidend. Dies gilt sowohl die flüchtenden Personen wie auch für die Rettungskräfte. Massgebende Schutzziele sind dabei:

- Ausreichende Anzahl vertikaler Fluchtwege
- Ausreichende Geometrie vertikaler (Treppen, Podeste) und horizontaler Fluchtwege
- Führung bis an einen sicherer Ort im Freien
- Minimierung von Brandlasten → Verwendung nichtbrennbarer Baustoffe, Ordnung im Treppenhaus
- Rauchfreiheit (in vertikalen Fluchtweg) → Möglichkeit der Entrauchung
- Kein Eindringen von Feuer und Rauch → Brandabschnittsbildung (Wände und Türen)

Grundsätzlich sind diese Schutzziele auch bei Bauten im Bestand einzuhalten. Gerade bei denkmalgeschützten Bauten ist dies aber nicht immer einfach. Veränderungen bei den geometrischen Verhältnisse und beim Erscheinungsbild (Materialisierung von Oberflächen und Treppenlauf) sind oft unerwünscht. Mögliche Lösungsansätze können sein (nicht abschliessend):

- Einbau zusätzlicher vertikaler Fluchtwege (z.B. Aussentreppe)
- Bekleidung der Treppenuntersicht mit Bekleidung K 30-RF1 (Abb. 3)
- Ausführung von Wandbekleidungen aus nichtbrennbaren Bekleidungen (Ausnahme lineare Bauteile; Abb. 3)
- Nachrüstung der brandabschnittsbildenden Bauteile (insbesondere Türen; Abb. 3)
- Schaffung von Entrauchungsmöglichkeiten (Abströmöffnung zuoberst im Treppenhaus)
- Einbezug Löschanlagenkonzept



Abbildung 3: Erweiterung / Aufstockung (Schule, Holzbau 4-geschossig; Löschanlagenkonzept)
Sanierung bestehendes Treppenhaus:
Bekleidung der Treppen- und Podestuntersichten K 30-RF1 (RF1 = A1; A2-s1,d0)
Nachweis (ev. Ertüchtigung) bestehender Riegelkonstruktion REI 60 (Lignum-Publ. 3.1 [6])
Bekleidung der Treppenhauswände (REI 60-RF1) mit K 60-RF1
Nachrüstung der Türen (EI30; Lignum-Publ. 8.1 [4])
Erneuerung der Bodenbeläge RF2 (Bfl-s1; Cfl-s1)

8. Einbezug technischer Brandschutzmassnahmen

Technische Brandschutzmassnahmen können die Brandsicherheit eines Gebäudes wesentliche verbessern. Dazu gehören insbesondere (nicht abschliessend):

- Brandmeldeanlagen
- Sprinkleranlagen
- Rauch- und Wärmeabzugsanlagen
- Blitzschutzsysteme

Sind diese in bestehenden Bauten nicht vorhanden, aber gemäss aktueller Brandschutzvorschriften obligatorisch, ist eine Nachrüstung unumgänglich z.B. der Einbau einer Brandmeldeanlage in einem Beherbergungsbetrieb (Hotel) ab einer bestimmten Grösse. Je nach Situation können sie jedoch auch «freiwillig» als kompensatorische Massnahmen eingesetzt werden. Im Vordergrund stehen dabei insbesondere Brandmeldeanlagen (schnelle Warnung von Personen) und Löschanlagen (Sprinkler, Sprühnebelsysteme). Diese führen zu einem raschen Eindämmung von (lokalen) Bränden und behindern somit deren Ausbreitung. Zudem findet eine schnelle Alarmierung der Feuerwehr statt. Gerade bei schutzwürdigen Bauten kann der Einsatz von Löschanlagen sinnvoll sein, um das Schutzziel «Erhalt geschützter Bauobjekte» zu erreichen (Abb. 4). Der Einsatz von Löschanlagen führt (in der Schweiz) zu einer Reduktion der geforderten Feuerwiderstände (Ausnahme vertikale Fluchtwege) und zu gewissen «Freiheiten» bei der Materialisierung in Fluchtwegen.

Bei der Sanierung / Umnutzung von Bauten im Bestand sollten in einer sehr frühen Phase Überlegungen zu möglichen technischen Brandschutzmassnahmen einbezogen werden. Je früher Brandschutzplanende und Brandschutzbehörden miteinbezogen werden, umso grösser sind möglich Spielräume für und mit kompensatorische Massnahmen.



Abbildung 4: Einbau von Löschanlagen in denkmalgeschützten Bauobjekten
Links: Zunfthaus zur Zimmerleute, Zürich
Rechts: Altes Zeughaus, Solothurn
Kombination mit Brandmeldeanlage und Haustechnik

9. Feuerwiderstand tragender und brandabschnittsbildender Bauteile

Grundsätzlich müssen tragende und brandabschnittsbildende Bauteile einen minimalen Feuerwiderstand aufweisen, welcher in den nationalen Brandschutzvorschriften definiert wird. Bei Bestandsbauten sind dabei oft (sichtbare) Tragwerksteile wie Stützen und Unterzüge, Geschossdecken (mit sichtbaren Balken; Abb. 5) und Türen betroffen. Etwas weniger betroffen sind Wände, da diese oft schon zu frühen Zeiten massiv gebaut wurden und somit in ihrer Grundkonstruktion einen gewissen Feuerwiderstand aufweisen.

Je nach Nutzung und Gebäudeabmessung betragen die geforderten Feuerwiderstände bis zur Hochgrenze bei Tragwerken, Geschossdecken und brandabschnittsbildenden Wände 30 oder 60 und bei Türen 30 Minuten. Löschanlagen führen zu einer Reduktion um 30 Minuten (CH), wobei ein minimaler Feuerwiderstand von 30 Minuten bis auf einige Ausnahmen nicht unterschritten werden kann.
Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf die Ertüchtigung bzw. den Ersatz von Geschossdecken

9.1. Ertüchtigung / Ersatz von Geschossdecken

Umnutzungen von bestehenden Gebäuden führen oft zu höheren Anforderungen bei den Geschossdecken. Dies gilt nicht nur für den Brandschutz, sondern auch für den Schallschutz, die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit (Durchbiegung und Schwingungsverhalten). Je nach Nutzung können zudem noch Anforderungen an die Raumakustik dazukommen. Es müssen somit die unterschiedlichsten Bedürfnisse unter eine Hut gebracht werden, welche ein interdisziplinäres Zusammenarbeiten der verschiedensten Fachplaner erfordert.

Bei Bauten unter Denkmalschutz steht in der Regel die Ertüchtigung bestehender Geschossdecken im Vordergrund, bei welchen des Erscheinungsbild erhalten werden soll. Schallschutz, Brandschutz, Tragfähigkeit und insbesondere Gebrauchstauglichkeit erfüllen jedoch die aktuellen Anforderungen oft nicht mehr.



Abbildung 5: Denkmalgeschütztes Gebäude mit sichtbarem Tragwerk und Gebälk der Geschossdecke

In Bezug auf den Brandschutz sind oft folgende Herausforderungen wesentlich:

- Schwierige Einschätzung eines möglichen Beitrages an den Brandschutz der Unterdecke und der Schichten des Bodenaufbaus
- Material in den Hohlräumen mit ungünstigem Brandverhalten (Sägemehl, Torf)
- Vorhandene, nicht zugängliche Hohlräume
- Undichtheiten bei Anschlüssen und Durchdringungen

Als Ertüchtigungsmassnahmen in Bezug auf den Brandschutz bieten sich folgende Möglichkeiten an:

Holzbalkendecken (nicht sichtbar):
- Beidseitige Bekleidung der für Normaltemperatur bemessenen Deckenkonstruktion mit Brandschutzplatten (BSP tt; tt = geforderter Feuerwiderstand in Minuten; Abb. 6)
- Ertüchtigung des gesamten Deckenaufbaus gemäss Vorgaben [2],[3], [5] (Abb. 7)
- Einbau einer entkoppelten Deckenkonstruktion (Abb. 8)
- Einbau eines Holzbeton-Verbund-Systems (Abb. 9)

Holzbalkendecken (sichtbar):
- Bemessung (Nachweis) der Holzbalken für dreiseitigen Abbrand [6]
- Ertüchtigung des Bodenaufbaus (Schichten über den Balken) gemäss Lignum-Dokumentation Brandschutz, Publikation 4.1 [3]
- Einbau eines Holzbeton-Verbund-Systems (Abb. 9)

Die brandschutztechnischen Nachweise können mit den bereits unter 5.1 geführten Dokumenten geführt werden [2], [3], [6]. Möglich ist in Absprache auch der Einsatz von geprüften Bauteilen mit VKF Anerkennung, VKF Technischer Auskunft oder Europäischer Technischer Auskunft (ETA); siehe Beispiel Abb. 8.

Abbildungen 6 – 9:
Prinzipzeichnungen; Rahmenbedingungen und Details: siehe [2], [3], [6]
Zusätzlich erforderliche Massnahmen für den Schallschutz sind nicht dargestellt.

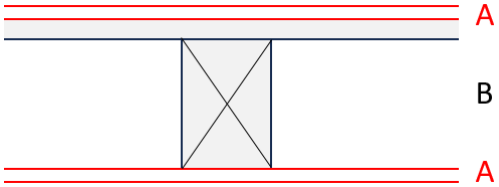


Abbildung 6: Ertüchtigung von Holzbalkendecken mit beidseitig aufgebrachter Brandschutzplatte (tt = geforderte Feuerwiderstandsdauer)
A: BSP tt gem. Lignum-Pub. 4.1, Tab. 462-2 [2]
B: Bestehende Konstruktion, statischer Nachweis Normaltemperatur

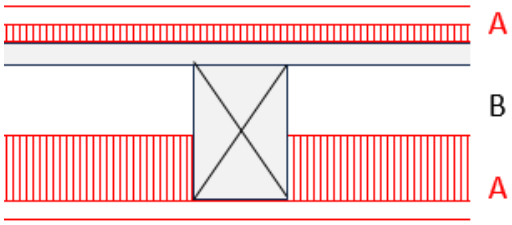


Abbildung 7: Ertüchtigung von Holzbalkendecken mit zusätzlich aufgebrachten Schichten
A: zus. Schichten gem. Lignum-Pub. 4.1, Tab. 431-3 (ff) [3]
B: Bestehende Konstruktion (Überprüfung der Mindestabmessungen erforderlich) (Lignum-Pub. 4.1, Tab. 431-3 (ff) [3] oder [6])

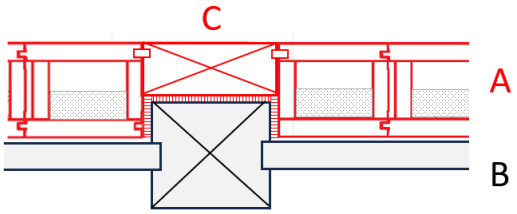


Abbildung 8: Ertüchtigung einer bestehenden Holzdecke mit erhaltenswerter Deckenuntersicht
A: Lösung mit Lignatur-Kastenelementen
REI tt gem. VKF Techn. Auskunft Nr. 30887 [10] oder ETA-11/0137 [11]
B: Bestehende Konstruktion (ohne statische und brandschutztechnische Funktion)
C: Massivholzdecke EI tt gem. Lignum-Pub. 3.1 [6] oder Lignum-Pub. 4.1 [2]; Tab. 435-1/-2

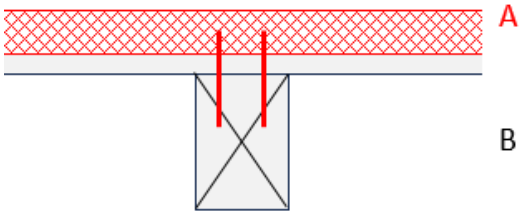


Abbildung 9: Ertüchtigung einer Geschossdecke mit Holzbeton-Verbund-System (Verbesserung Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Schallschutz, Brandschutz)
A: Betonplatte REI 30: ≥ 60 mm; REI 60 ≥ 80 mm; Überdeckung Armierung ≥ 20 mm
B: Bestehende Konstruktion (Überprüfung Mindestabmessungen erforderlich):
Tragschicht: Massivholzschalung oder Holzwerkstoffplatte d ≥ 20 mm
Balken: REI 30 ≥ 120 x 200 mm; REI 60 ≥ 180 x 200 mm oder Bemessung gem. Lignum Pub. 3.1 [6]

Umnutzungen und der Zustand der bestehenden Deckenkonstruktion (Feuchteschäden, starke Schädigung oder Nichtmehrvorhandensein nach Brandereignissen können zum Ersatz der ganzen Deckenkonstruktion führen. Entscheidende Einflüsse sind dabei oft auch höhere Einwirkungen und grössere Stützweiten, wenn z.B. tragende Wände entfernt werden. Es kann zudem vorkommen, des Decken gar noch nicht vorhanden sind und neu eingebaut werden müssen (z.B. bei der Umnutzung bestehender Industriehallen in Wohngebäude).

Grundsätzlich gelten da in etwa die gleichen Kriterien für den Entwurf wie bei Neubauten. Die gegebenen Rahmenbedingungen können jedoch Einschränkungen und zu höheren Herausforderungen für die Planenden führen:

- Zur Verfügung stehende Konstruktionshöhe (in Abhängigkeit der Raumhöhen)
- Auflagersituation und Lastableitung (Abb. 10)
- Einsatzmöglichkeiten von Transport- und Hebemitteln für den Einbau (Abb. 11)
- Übrige Anforderungen (Schallschutz, Akustik, Luftdichtheit, Ästhetik; Abb. 12)
- Brandschutz während der Bauphase (z.B. fehlende oder lückenhafte Brandabschnittsbildung)

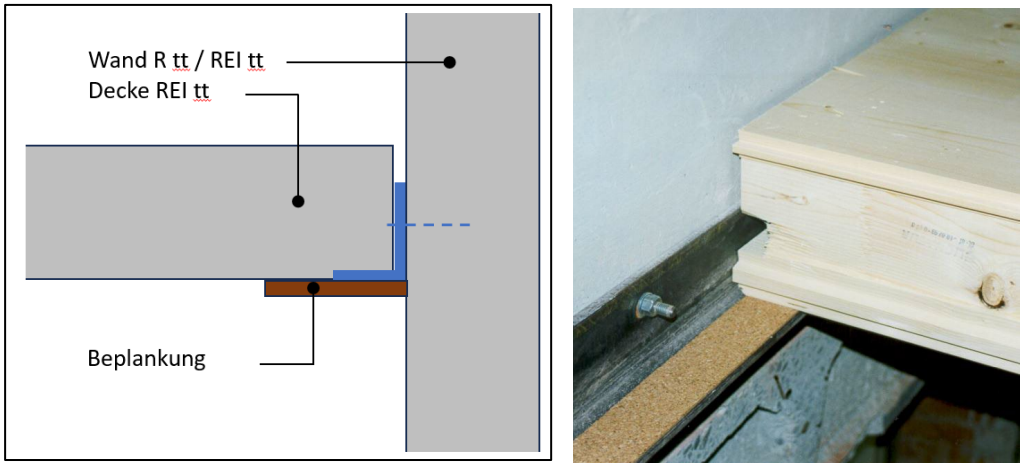


Abbildung 10: Einbau neuer Geschossdecken in Bestandsbauten
Auflagerausbildung mit Stahlwinkel (Quelle Foto, Lignatur Waldstatt)
Untere Beplankung gemäss Lignum-Pub 4.2; Abb. 428-2 [8]



Abbildung 11: Einbau neuer Geschossdecken in Bestandsbauten (Quelle: Lignatur, Waldstatt)
Einbaumöglichkeit «von Hand» dank geringem Eigengewicht




Abbildung 12: Rekonstruktion einer Geschossdecke nach Brandereignis (Zunfthaus Zürich)
Anforderung REI 60 (Reduktion dank Sprinkleranlage auf REI 30)
Einbau von Stahlträgern zur Reduktion der Konstruktionshöhe; Untere Beplankung gemäss Lignum-Pub 4.2; Abb. 428-2 [8] erforderlich
Rekonstruktion der Deckenuntersicht in Holz (Anforderung Denkmal- bzw. Kulturgüterschutz)

10. Zusammenfassung

Brandschutz im Bestand ist anspruchsvoll und erfordert einerseits eine hohe Fachkompetenz und anderseits eine gewisse Kompromissbereitschaft bei der gemeinsamen Lösungssuche zwischen den Generalplanenden als Vertretung der Bauherrschaft, den Fachplanenden Brandschutz und den Brandschutzbehörden. Wichtige Punkte sind:

- Klare Definition der Projektziele durch Bauherrschaft und Generalplanende (insbesondere der vorhergesehenen Nutzungen).
- Frühzeitige Zusammenarbeit aller beteiligten Planenden und Behörden, beginnend bereits bei den Abklärungen zum Bestandschutz.
- Saubere und vollständige Bestandsaufnahme durch die Fachplanendenden.
- Kreative Lösungssuche der Fachplanenden Brandschutz bei der Entwicklung des Brandschutzkonzeptes und der Brandschutzpläne (als Grundlage für die Besprechungen mit den Brandschutzbehörden).
- Als oberstes Schutzziel gilt die Personensicherheit von Nutzern und Rettungskräften, was zu ausreichenden und sicheren Flucht- und Rettungswegen führen muss.
- Technische (und ev. organisatorische) Brandschutzmassnahmen können als kompensatorische Massnahmen helfen, beim Brandschutzkonzept und bei den baulichen Schutzmassnahmen Kompromisse in Absprache mit den Brandschutzbehörden zu finden.
- Brandereignisse mit hohen Auswirkungen entstehen oft während der Bauphase. Die Erarbeitung eines Brandschutzkonzeptes für die Bauphase und dessen Umsetzung ist deshalb unerlässlich.
- Die Entstehung von Bränden lassen sich weder durch bauliche noch technische Brandschutzmassnahmen verhindern. Die häufigsten Ursachen liegen beim menschlichen Verhalten und bei mangelhaften elektrischen Installationen und Geräten. Eine entsprechende Instruktion von Nutzern sowie ein ausreichender Unterhalt sind deshalb zu gewährleisten. Insbesondere ist darauf zu achten, dass Flucht- und Rettungswege dauerhaft freigehalten und benutzbar sein müssen.

11. Literatur

11.1. Verwendete Literatur

[1] VKF, Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen, 2015: Schweizerische Brandschutzvorschriften VKF, verfügbar unter: www.bsronline.ch.

[2] DIN, Deutsches Institut für Normung, 2016: DIN-Norm 1402-4: 2016: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Beuth Verlag, Berlin.

[3] Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, 2017: Lignum-Dokumentation Brandschutz, 4.1 Bauteile in Holz – Bauteilen mit Feuerwiderstand, Lignum Zürich.

[4] Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, 2021: Lignum-Dokumentation Brandschutz, 8.1 Abschlüsse – Fenster-. Tür- und Trennwandsystem, Lignum Zürich.

[5] Wilhelm Ernst u. Sohn, Berlin 31, 2009: Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V.: Holz-Brandschutz Handbuch,

[6] Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, 2021: Lignum-Dokumentation Brandschutz, 3.1 Feuerwiderstandsbemessung – Bauteile und Verbindungen, Lignum Zürich

[7] CEN, Europäisches Komitee für Normung, 1995: *EN-Norm 1995-1-2:* Eurocode 5: Holzbauten: Tragwerksbemessung für den Brandfall, Brüssel.

[8] Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, 2018: Lignum-Dokumentation Brandschutz, 4.2 Bauteile in Holz – Anschlüsse bei Bauteilen mit Feuerwiderstand, Lignum Zürich.

[9] Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, 2017: Lignum-Dokumentation Brandschutz, 1.1 Bauten in Holz – Brandschutzanforderungen, Lignum Zürich

[10] VKF, Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen, 2015: Schweizerisches VKF-Brandschutzregister, verfügbar unter: www.bsronline.ch.

[11] OiB, Österreichisches Institut für Bautechnik, 2021: Europäische Technische Bewertung (ETA-11/0137, Oib Wien)

11.2. Weiterführende Literatur

– WTA, Brandschutz im Bestand und bei Baudenkmalen; Merkblätter 11-1 bis 11-3, Frauenhofer IRB, Stuttgart
– Gerd Geburtig, Diverse Bücher zum «Baulicher Brandschutz im Bestand», «Brandschutz im Baudenkmal» sowie «Brandschutz im Bestand: Holz» Frauenhofer IRB, Stuttgart
– Deutsche Gesellschaft für Holzforschung, Holz Brandschutz Handbuch, 3. Auflage, Ernst&Sohn, Berlin
– Ralf Heidelberg, Praxishandbuch «Brandschutz im Bestand», www. feuertrutz.de
– BFH-AHB: Leitfäden VETA/NOVA «Gebäudeerneuerung Oberwallis», Teil 6; Brandschutz, Teil 8: Detailkatalog, www.vetanova.ch

BRAND
Fassadenkonstruktionen in und auf Holz

Prüfverfahren für das Brandverhalten von Fassaden
Einfluss auf Holzfassaden

DI (FH) Josef Huber
IBS-Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung GmbH
Linz, Österreich



Prüfverfahren für das Brandverhalten von Fassaden
Einfluss auf Holzfassaden

1. Standortbestimmung

Dem Wunsch, Gebäude in Holzbauweise in die Höhe bauen zu können, wird immer wieder mit innovativen Lösungen Rechnung getragen. Am Beispiel des bereits realisierten Aussichtsturms «Pyramidenkogel» im Bundesland Kärnten in Österreich kann gezeigt werden, dass solche Projekte realisierbar sind. Obwohl dieses Projekt gemäß der Kärntner Bauordnung – welche zum Zeitpunkt der Errichtung des Aussichtsturms bereits die OIB-Richtlinie umgesetzt hatte – in dieser Form nicht zu genehmigen gewesen wäre. Der Schlüssel zur Erlangung einer Baugenehmigung liegt in einem umfassenden Brandschutzkonzept, welches eine Kombination aus baulichen und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen berücksichtigt.
Wir haben in den österreichischen Bauvorschriften im Hochhausbereich die Anforderung, Materialien zu verwenden, die der Brennbarkeitsklasse A2 zuzuordnen sind. Es gibt kein Regelwerk, welches die von der Architektur gewählten Materialzusammensetzung in dieser Form kennt. Ein Hochhaus darf im Sinne der österreichischen Baugesetzgebung nach 90 min die Tragfähigkeit verlieren.
Das Bauvorhaben Pyramidenkogel hatte jedoch schärfere Anforderungen, die durch den Betreiber gestellt wurden, und muss viel länger einer Brandeinwirkung standhalten. Mit der obersten Besucherebene auf über 70 m über Gelände und einem Restaurantbereich auf 57 m, sind hier besondere Anforderungen zu stellen. Es dürfen insgesamt 500 Personen den Aussichtsturm gleichzeitig nutzen. Hierfür stehen zwei Treppen und ein Panoramalift zur Verfügung.
Kurz zusammengefasst war eine Wasserlöschanlage und einige weitere, technische Maßnahmen zur Kompensation der Schlüssel, um eine Baugenehmigung erhalten zu können.

Ein weiteres Projekt wurde im Wiener Osten im Stadtteil Aspern errichtet. Das Hoho – Holzhochhaus Aspern – weist eine Höhe von 84 m für 24 Geschosse auf. 57% des Gebäudes bestehen aus Holz, lediglich der Kern wurde in Betonbauweise hergestellt. Das Gebäude ist bereits mehrere Jahre in Betrieb und wird für Büros, Gewerbeflächen und Apartments genutzt. Auch hier war der zentrale Ansatzpunkt für die Baugenehmigung das umfassende Brandschutzkonzept.

2. Baurechtliche Forderungen vs. Prüfregelwerke

Unterhält man sich über Regelungen für Bauwerke, sind jedenfalls zwei Kategorien zu unterscheiden:

1. Die Regelungen auf europäischer Ebene definieren die Leistungsmerkmale und Kenndaten von Bauprodukten. Als Beispiel können hier unterschiedliche Prüf- und Klassifizierungsnormen aus dem Bereich des Brandschutzes zitiert werden.
2. Weiters gibt es Regelungen im nationalen Bereich, die Aussagen darüber treffen, wie diese Bauprodukte einzusetzen sind. Als Beispiele können Regulative wie die Musterbauordnung oder die OIB-Richtlinien angeführt werden.

Im Regelfall unterscheiden die gesetzlichen Grundlagen die Bauwerke anhand ihrer Größe. Konkret kennt die OIB-Richtlinie 2 in ihrer derzeitigen Form 5 Gebäudeklassen. Hiervon ausgenommen sind Häuser mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m. Diese sind der OIB-Richtlinie 2.3 zuzuordnen. Eine ähnliche Zuordnung in Gebäudeklassen gibt es auch in Deutschland.

2.1. Forderungen der OIB-Richtlinie 2

In der Tabelle 1a der OIB-Richtlinie 2 werden gleich an erster Stelle Anforderungen an Fassadensysteme festgelegt. In Abhängigkeit der Gebäudeklasse werden Brennbarkeit und Brandklassen der verwendeten Baustoffe definiert.

Des Weiteren behandelt das Kapitel 3.5 der OIB-Richtlinie 2 Anforderungen an Fassaden. Auch hier findet eine Einteilung sowie die Unterscheidung in Gebäudeklassen statt. Konkret ist zu erwähnen, dass für die Gebäudeklassen 4 und 5 besondere Festlegungen getroffen wurden: Es darf zu keiner Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über den Brandherd liegende Geschoss kommen und das Herabfallen großer Fassadenteile ist einzuschränken. Dies ist schon ein erster Hinweis auf die in Österreich gültige Prüfnorm für Fassadenkonstruktionen, die ÖNORM B 3800-5.
In der aktuellen Ausgabe 2023 der OIB-Richtlinie 2 wurden einige Ergänzungen über Fassadenbegrünung und Fotovoltaikanlagen an Fassaden vorgenommen.

2.2. Forderungen der OIB-Richtlinie 2.3

Präskriptive Forderungen an Fassadenkonstruktionen finden sich ebenso im Textteil im Kapitel 2.3, als auch in der Tabelle 1 der OIB-Richtlinie 2.3. In Analogie zur OIB-Richtlinie 2 sind die Anforderungen an die Konstruktion der Fassade, die eine Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoss verhindern müssen, definiert. Des Weiteren dürfen ebenfalls keine großen Fassadenteile herabfallen. Dies ist unter dem Gesichtspunkt der generellen Forderung nach nichtbrennbaren Bauteilen zu sehen.

2.3. Einsatzmöglichkeiten der Feuerwehr

Die einsatztaktischen Möglichkeiten der Feuerwehr darf man nicht außer Acht lassen.
Deren wichtigste Aufgabe im Brandfall ist es, Menschenleben zu retten. Nach deren Taktik ist dementsprechend ein Innenangriff zum Löschen des Brandes, möglicherweise kombiniert mit einer Menschenrettung, das Maß der Dinge.
Dieses Szenario eines kritischen Wohnungsbrandes ist auch der Maßstab für die Bereitstellung der Einsatzmittel und des entsprechenden Personals. In diesem Zusammenhang wurde Ende 2023 ein Merkblatt des Deutschen Feuerwehrverbandes für wirksame Löscharbeiten an Holzfassaden publiziert. Dieses Merkblatt referenziert auf den Punkt 6.3 der Musterrichtlinie brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbegleitungen in Holzbauweise.
Das Merkblatt des Deutschen Feuerwehrverbandes unterscheidet sechs Fälle und stuft die Fassadenhöhe entsprechend der Erreichbarkeit mit Mitteln der Feuerwehr ein. Wesentliche Parameter sind hier die notwendige Aufstellmöglichkeit und Zugänge für die Einsatzkräfte, respektive die notwendigen Fahrzeuge.
Nicht außer Acht gelassen werden darf auch die notwendige Löschwasserversorgung, beispielsweise für Fassadenhöhen bis 16 m, da hier ein B-Strahlrohr aufgrund der Wurfweite und Deckungsbreite als Mittel der Wahl anzusehen ist. Ein aus taktischer Sicht guter Lösungsansatz ist der Fall 5, bei dem die Erreichbarkeit über Balkone und Dächer in Abstimmung mit der zuständigen Brandschutzdienstelle als Variante vorgesehen ist.

2.4. Unterschiedliche Prüfregelwerke in den Ländern

Wenn man nun die unterschiedlichen Brandszenarien betrachtet, welche auf Fassadenbauteilen einwirken können, so sind dies:
- Brände, die durch Wärmestrahlung hervorgerufen werden,
- Brände, die im Bereich des Sockels durch z.B. in Brand geratene Müllbehälter oder abgestellte Kraftfahrzeuge hervorgerufen werden,
- Brände im Gebäude, welche die Fensterscheiben zerbersten, Flammen aus dem Brandraum herausschlagen und auf die Fassade übergreifen lassen.

In der Literatur verankert, aber auch durch viele Versuche belegt, ist der Übergriff eines Brandes in einem Gebäude nach ca. 15 min nach außen an die Fassade. Der Übersprung ins nächste Geschoss inklusive Zimmerbrand dauert weitere 25 min. Somit erreicht der Brand nach 90 min das vierte über dem ursprünglichen Brandausbruchsbereich befindliche Stockwerk.

Aus diesen unterschiedlichen Brandszenarien sowie der zeitlichen Abfolge ergeben sich die einzelnen Prüfregulative und Anforderungen an die Teststellung zur Prüfung von Fassadenelementen.

Per heute stellt sich die Lage so dar, dass annähernd jedes Land eine eigene Regelung für Prüfverfahren von Fassadensystemen publiziert hat.
Exemplarisch darf hier eine kurze Auflistung dargestellt werden:
- Österreich: ÖNORM B 3800-5
- Deutschland: DIN 4102-20
- Großbritannien: BS 8414-1
- Schweden: SP-Fire 105

Dies bedeutet, dass Hersteller von Fassadenkonstruktionen unterschiedliche Prüfprozedere absolvieren und bestehen müssen, um im jeweiligen Land ihre Produkte einsetzen zu können. Diese Prüfprozedere sind – wie alle Prüfverfahren – standardisierte Vorgänge, die unter Laborbedingungen immer wieder gleiche Ergebnisse liefern müssen. Im Vergleich dazu gibt es im Fassadenbereich zwei unterschiedliche Zugänge: einmal die große Fassadenprüfung, welche dem British Standard 8414-1 zuzuordnen ist und drei Etagen berücksichtigt, und einmal die «kleinere» Fassadenprüfung anhand der ÖNORM B 3800-5 und DIN 4102-20, die zwei Etagen berücksichtigt.

2.5. Überarbeitung der ÖNORM B 3800-5

Die ÖNORM B 3800-5 wurde 2024 neu publiziert. Grund dafür war eine Überarbeitung aufgrund der Erkenntnisse der letzten Jahre. Der Anwendungsbereich der ÖNORM B 3800-5 für Außenwand-Wärmeverbundsysteme, sowie vorgehängte, hinterlüftete Fassaden ist nach wie vor ident.
Eine Prüfung gemäß dieser ÖNORM lässt Aussagen über die Begünstigung einer Brandausbreitung, sowie eine Aussage, ob es durch herabfallende Teile zu einer Personengefährdung kommt, zu. Jedoch sagt die ÖNORM nichts über das Brandverhalten von Bauteilen oder zum Prüfprozedere gemäß EN 1364-4 aus.

Die Prüfungen gemäß ÖNORM B 3800-5 werden in einem 6 m hohen Prüfstand in einer Eckanordnung durchgeführt.
Als Brandlast wird eine Holzkrippe mit 25 kg eingebracht. Die Versuchsdauer beträgt 30 min. Es erfolgt eine visuelle Beobachtung und messtechnische Erfassung der Temperaturen an der Fassade und – sofern vorhanden – im Hinterlüftungsspalt.
Ein positives Prüfergebnis wird erzielt, wenn es zu einer wirksamen Einschränkung der Brandweiterleitung kommt und kein Herabfallen großer Teile verzeichnet wird.
Normativ sind große Teile mit einem Gewicht von 3 kg und einer Fläche von 0,4 m² definiert. Mit dieser Anforderung soll erfüllt werden, dass Rettungsmannschaften nicht durch herabfallende Teile gefährdet werden. Des Weiteren darf es bis zum Zeitpunkt des Rückgangs der Energiefreisetzung der Brandlast im Spalt der Hinterlüftung zu keinen höheren Temperaturen als 100 mm vor der Fassade kommen.

3. Projekt zur Bewertung des Brandverhaltens von Fassaden auf europäischer Ebene

3.1. Ausgangssituation

Im Jahr 2019 erfolgt durch die europäische Kommission eine Ausschreibung für eine Projektarbeit mit dem Titel «Abschluss des europäischen Konzepts zur Bewertung des Brandverhaltens von Fassaden». Diese Ausschreibung hat ein Bieterkonsortium aus unterschiedlichen Staaten gewonnen. Die Projektleitung liegt bei RISE aus Schweden. Das finale Ziel dieses Projektes ist es, die Grundlagen so aufzubereiten, dass diese in einen Normungsprozess eingespeist werden können, um eine harmonisierte Produktnorm erarbeiten zu können.

3.2. Projektinhalte und Projektablauf

Das Projekt startete mit einem theoretischen round robin. Unzählige Labors, vorwiegend aus dem europäischen Raum, wurden zur derzeitigen Vorgehensweise befragt, die Ergebnisse anschließend ausgewertet und in die Dokumentation eingearbeitet. Ein weiterer Schritt war die Untersuchung der unterschiedlichen Brandszenarien. Man konzentrierte sich auf die Untersuchung der Holzkrippen, welche im Regelfall als Brandlast bei den Testaufbauten verwendet werden. Im Anschluss wurden mehrere Tests mit unterschiedlichen Fassadenkonstruktionen in den Labors durchgeführt. Diese Prüfungen wurden sowohl im Freien als auch innerhalb der Prüflabors durchgeführt und die unterschiedlichen Ergebnisse (sofern welche erkennbar waren) zueinander in Relation gesetzt. Der Fokus lag auf der Festlegung der einheitlichen Bewertungsmethode der Ergebnisse. Nicht außer Acht gelassen werden bei den einzelnen Prüfszenarien und somit auch bei der Bewertung herabfallende Teile. Dies unter dem Gesichtspunkt, dass bereits in vielen existierenden nationalen Bewertungsmethoden die herabfallenden Teile zu berücksichtigen sind und die daraus resultierende Gefahr für flüchtende Personen oder Einsatzkräfte einfließt. Die überwiegende Mehrheit der befragten Mitgliedstaaten hat sich dafür ausgesprochen, die nationalen Testmethoden bis zur Publikation der vereinheitlichten Testszenarien einzuhalten.

3.3. Projektabschluss und (vorläufige) Ergebnisse

Gemäß Zeitplan wird dieses Projekt im Frühling 2024 abgeschlossen sein und der Bericht an den Auftraggeber – die europäische Kommission – übermittelt. Per März 2024 liegen die entsprechenden Dokumente bereits im Entwurfsstadium vor. Diese sehr umfangreiche Dokumentation beinhaltet die Aufarbeitung der einzelnen Projektschritte und Darstellung der Auswertungen der einzelnen Prüfszenarien und Vergleichsprüfungen. Wesentliche Inhalte des Abschlussberichtes sind auch zwei Vorschläge für jeweils ein Prüfregulativ für einen großen Fassadentest und einen mittleren Fassadentest. Der große Fassadentest entspricht im Wesentlichen den Forderungen des bereits etablierten Szenarios gemäß British Standard 8414-1, der mittlere Fassadentest basiert auf Fundamenten der Anforderungen der DIN 4102-20. Des Weiteren gibt es einen Vorschlag für eine Norm zur Klassifizierung der Ergebnisse dieser beiden Tests. Diese Norm umfasst im Wesentlichen Inhalte der bereits bekannten EN 13501-Serie. Aus Sicht einer Prüf- oder Zertifizierungsstelle wäre auch noch die Erstellung von EXAP-Regeln anzustreben.

Bezüglich der weiteren Vorgehensweise, insbesondere des Zeithorizontes, muss man den laufenden Prozess zur Überarbeitung der Bauproduktenverordnung inkl. Acquis-Prozesses auch in Betracht ziehen. Anzunehmen ist, dass dies über das bestehende Mandat M108 abgewickelt wird. Das zuständige Gremium auf CEN-Ebene wäre über das Mandat zur Erstellung dieser harmonisierten Normen zu beauftragen. In Abhängigkeit der Prioritätenreihung und Arbeitsaufträge der Komitees und Arbeitsgruppen, wird dieser Normschaffungsprozess länger oder kürzer dauern, eine Zeitangabe an dieser Stelle wäre unseriös.

4. Fazit

Betrachtet man die Vorgaben aus den einzelnen legislativen Regelungen der Länder, bewegen wir uns in Österreich mit brennbaren Fassadenkonstruktionen im Regelfall in den Gebäudeklassen 4 und 5. Es braucht einige konstruktive Maßnahmen, wie Brandriegel oder Brandsperren zur wirksamen Verhinderung der Brandausbreitung über die Fassade. Die generelle Forderung einer nicht brennbaren Fassadenkonstruktion im Hochhausbereich bleibt derzeit weiterhin unangetastet. Wie eingangs an zwei Beispielen gezeigt, kann jedoch mit dem Zusammenspiel von baulichen und technischen Maßnahmen eine Nachweisführung erfolgen, um die geforderten Schutzziele zu erreichen. Dies sind jedoch individuell auf das jeweilige Bauwerk abgestimmte Konzepte. Die nunmehr vorliegenden, sowie in Ausarbeitung befindlichen, Regelwerke zur Prüfung von Fassadenkonstruktionen beschäftigen sich auch intensiv mit alternativen, teilweise auch brennbaren (Stichwort PV-Module), Baustoffen. Unter Einbeziehung der Einsatzgrenzen der Feuerwehren und ausreichend validierten Daten als Grundlage für die Prüfregelwerke wird es in Hinkunft möglich sein, einheitliche Fassadentests europaweit durchzuführen.

5. Literatur

[1] OIB-Richtlinie 2, Brandschutz, Ausgabe Mai 2023

[2] OIB-Richtlinie 2.3, Brandschutz bei Gebäuden mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 m, Ausgabe Mai 2023

[3] ÖNORM B 3800-5, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 5: Verhalten von Fassaden im Brandfall, Austrian Standards International, Ausgabe 15.01.2024

[4] ÖNORM B 2332, Brandschutztechnische Ausführung von Fassaden aus Holz und Holzwerkstoffen in den Gebäudeklassen 4 und 5 – Anforderungen und Ausführungsbeispiele, Austrian Standards International, Ausgabe 01.12.2015

[5] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise, Deutsches Institut für Bautechnik, Fassung Oktober 2020

[6] Wirksame Löscharbeiten an Holzfassaden, Fachausschuss Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz der deutschen Feuerwehren, 21.11.2023

[7] TRVB 134/17 (F) Flächen für die Feuerwehr auf Grundstücken, ÖBFV, Ausgabe 2017

[8] Präsentation «Spezialthema: Brandschutz bei Fassaden; Dieter Werner, MA39, April 2023

[9] Abschluss des europäischen Konzepts zur Bewertung des Brandverhaltens von Fassaden, SJ S 179/2019 17/09/2019; Europäische Kommission

[10] New European fire test of facades, Projektdatenbank, RISE https://www.ri.se/en/what-we-do/projects/european-approach-to-assess-the-fire-performance-of-facades

[11] Finalisation of the European approach to assess the fire performance of facades, March 2024 (J. Anderson, J. Sjöström, R. Chiva, A. Hofmann.Böllinghaus, P. Toth, O. Lalu)

[12] Draft Report of the 41th meeting of CEN/TC 127 on Fire Safety in Buildings on 7th November 2023, London

Fassadenbegrünung an mehrgeschossigen Gebäuden aus brandschutztechnischer Sicht

Dr.-Ing. Thomas Engel
Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
München, Deutschland



Fassadenbegrünung an mehrgeschossigen Gebäuden aus brandschutztechnischer Sicht

1. Einleitung

Begrünte Fassaden werden zunehmend populärer. Gründe hierfür sind u. a., dass durch begrünte Fassaden in urbanen Räumen die Luftqualität und die thermische Leistung des Gebäudes verbessert, der Wärmeinseleffekt verringert und Lärm durch Absorption reduziert werden sollen [1], [2]. Der Begriff begrünte Fassaden ist ein Überbegriff für sehr unterschiedliche konstruktive Ausführungen von Fassadenbegrünungen. Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Arten von Fassadenbegrünungen. Prinzipiell zu unterscheiden sind eine direkte bodengebundene Begrünung an der Außenwand durch Kletterpflanzen, eine indirekte bodengebundene Begrünung durch von der Außenwand abgesetzte Kletterhilfen und begrünte Wandsysteme mit Bepflanzung in Gefäßen oder an flächigen vertikalen Vegetationsflächen (Living Wall). Auch Mischformen sind möglich. [3][4][5]

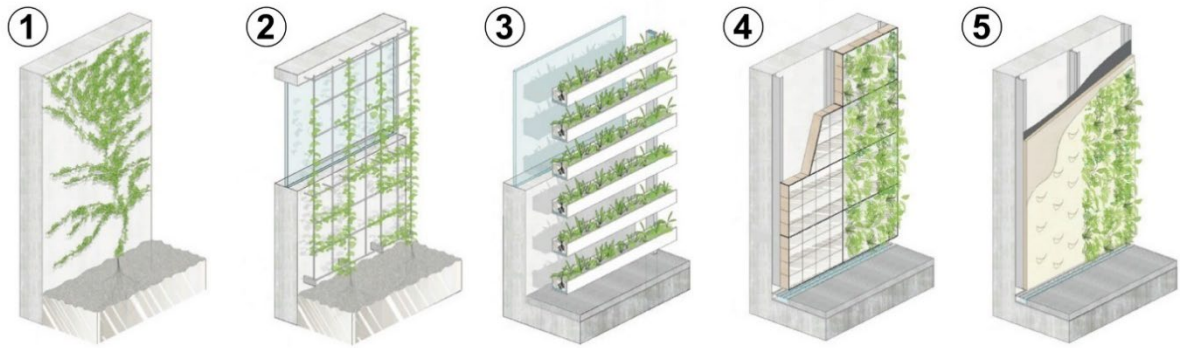


Abbildung 1: Ausbildungsformen von Fassadenbegrünungen. 1) Direktbewuchs mit Selbstklimmern, bodengebunden, 2) leitbarer Bewuchs an Kletterhilfen, bodengebunden, 3) Pflanzgefäße, horizontale Vegetationsflächen, wandgebunden, 4) modulares System (Living Wall), vertikale Vegetationsflächen, wandgebunden, 5) flächiges System (Living Wall), vertikale Vegetations-flächen, wandgebunden; basierend auf Bildquelle [5]

Für bodengebundene Begrünungen an Kletterhilfen haben sich je nach Dickenwuchs (Wüchsigkeit) Wandabstände von 50 bis 200 mm zur Kletterhilfe etabliert [4], [5]. Ein ausreichender Abstand ist neben der Wüchsigkeit der Pflanze auch aufgrund der sonst möglichen Überhitzung der Gerüstkletterpflanze durch die Außenwand notwendig [5].

Wandgebundene Begrünungssysteme (ohne Bodenanschluss) zeichnen sich durch integrierte Bewässerungssysteme, beliebige Begrünungsgrößen und einfache Austauschbarkeit der Pflanzen aus. Sie ermöglichen eine vorkultivierte Begrünung der Fassade ab Fertigstellung des Gebäudes durch Modul- oder Regalsysteme [3], [5]. Eine wandgebundene Begrünung in Form einer "Living Wall" ist ein komplettes, vorgehängtes, hinterlüftetes Fassadensystem. Es besteht aus Hinterlüftung, Unterkonstruktion, Tragstruktur, Trägerplatten, Dämmung, Substrat, Vlies, Bewässerungssystem und der Pflanze selbst. Die Systeme unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller erheblich.

Die Verwendung von Kletterpflanzen zur Fassadenbegrünung weist viele regionale Besonderheiten auf [3], [4], [5]. Das Artenpotenzial für Kletterpflanzen in der DACH-Region umfasst ca. 150 Arten und Sorten [3]. Das Spektrum der möglichen Pflanzenarten für wandgebundene Begrünungssysteme ist wesentlich umfangreicher. Für die DACH-Region werden in [4] ca. 100 Arten und Sorten aufgeführt. Zu unterscheiden sind Stauden, Gräser und Klettergehölze [3].

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen Beispiele für realisierte Grünfassaden.



Abbildung 2: Bodengebundener Bewuchs an Kletterhilfen (Swiss Re Bürogebäude München); (Quelle: Bundesverband GebäudeGrün)



Abbildung 3: Wandgebundenes Begrünungssystem (Stadtverwaltung Venlo Niederlande); (Quelle: Bundesverband GebäudeGrün)

2. Brandschutztechnische Bewertbarkeit der verschiedenen begrünten Fassadentypen

Wie im Abschnitt zuvor beschrieben sind «Living Walls» komplexe Fassadensysteme, die sich von Hersteller zu Hersteller erheblich unterscheiden. Die herstellerspezifischen Systeme lassen sich nur durch großmaßstäbliche Brandversuche am jeweiligen Gesamtsystem produktspezifisch zielführend untersuchen [6]. Anders verhält sich dies für Kletterpflanzen an Rankhilfen. Diese können brandschutztechnisch allgemeingültig untersucht und im Folgenden bewertet werden. Aus diesen Untersuchungen ergeben sich allgemein gültige Prinzipien für einen brandschutztechnisch sicheren Betrieb [6].

3. Stand der Forschung

Zum Brandverhalten begrünter Fassaden und der daraus folgenden Brandweiterleitung über die Fassaden stehen zum aktuellen Zeitpunkt international nur wenige Erkenntnisse zur Verfügung. Eine genaue Übersicht zum aktuellen Stand der Forschung für das Brandverhalten von begrünten Fassaden kann [6] und [7] entnommen werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mittel- bzw. großmaßstäbliche Brandversuche an begrünten Fassaden bis dato vor allem in Österreich und Deutschland durchgeführt wurden. Diese Untersuchungen fanden jedoch vorwiegend an genormten Fassadenbrandprüfständen, die ursprünglich für einen anderen Anwendungsfall konzipiert wurden und nicht den Einwirkungen realer Brandereignisse entsprechen [6], statt. Die aktuelle Herausforderung für begrünte Fassaden besteht folglich darin, dass Ergebnisse skalierter Prüfverfahren, wie beispielsweise nach [8] oder [9], in Verbindung mit Bewertungskriterien, die ebenfalls für andere Baustoffe konzipiert wurden, direkt in die Realität überführt bzw. Maßnahmen darauf aufbauend abgeleitet werden. Dieses Vorgehen kann zu unrealistischen Ergebnissen führen und birgt ohne gesamtheitliche Betrachtung Risiken [6].

Die Auswertung des Stands der Forschung liefert zwei wesentliche Erkenntnisse: Erstens ist eine regelmäßige Pflege und Wartung eine wichtige Grundlage für eine brandschutztechnisch sichere Fassadenbegrünung. Großflächig abgestorbene Pflanzen müssen zeitnah erkannt und entfernt werden. Zweitens ist bei einer Brandbeanspruchung der begrünten Fassaden mit einem Austrocknen der Begrünung und im weiteren Verlauf mit einer abrupten kurzweiligen Brandausbreitung («Strohfeuer») begrenzender Bereiche außerhalb des Primärbrandes zu rechnen. [6], [7]

4. Brandverhalten der Pflanzen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens FireSafeGreen [10] wurde in einem ersten Teil das Brandverhalten von begrünten Fassaden untersucht. Im Fokus stand hierbei die Entflammbarkeit begrünter Fassaden, die im Rahmen von 43 kalorimetrischen Brandversuchen im mittleren Maßstab mit der Prüfmethode Single Burning Item (SBI) [11] bewertet wurde. Schwerpunkt der Untersuchung waren insgesamt 25 Kletterpflanzenarten. Der Haupteinflussfaktor auf das Brandverhalten von Pflanzen ist der Feuchtigkeitsgehalt der Pflanze [7]. Ein Vergleich der Wärmefreisetzungsrate von vitalen Pflanzen (normaler Feuchtigkeitsgehalt) zeigt ein ähnliches Verhalten, vgl. Abbildung 4.

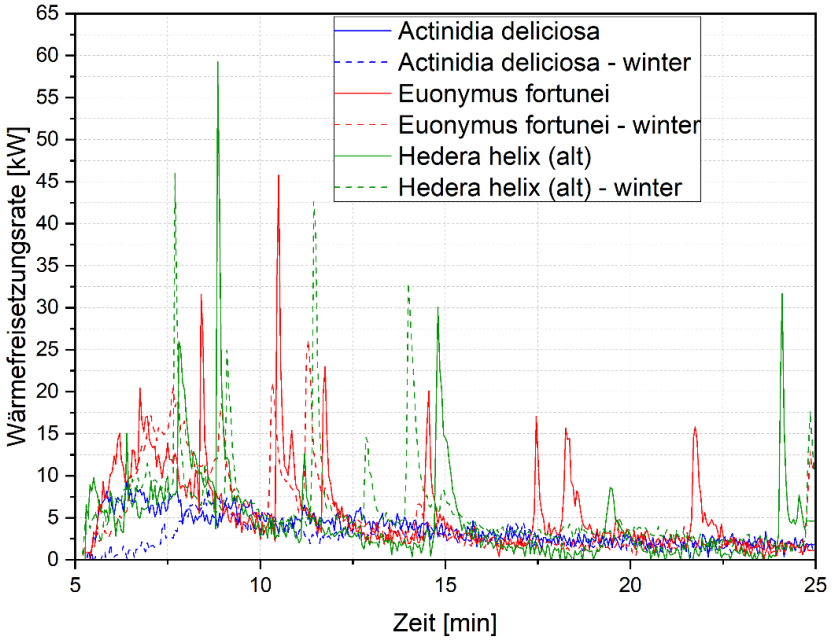


Abbildung 4:Vergleich der Wärmefreisetzungsrate von *Actinidia deliciosa*, *Euonymus fortunei* und *Hedera helix* im Sommer und Winter

Im Verlauf der Beanspruchung kommt es zu kurzen Spitzen der Wärmefreisetzungsrate. Diese Spitzen sind die aus vorherigen Untersuchungen bekannten «Strohfeuer». Sie entstehen, wenn Teile der Pflanzen durch die Brandeinwirkung austrocknen und sich dann schlagartig entzünden. Die Pflanzenart selbst hat keinen signifikanten Einfluss auf das Brandverhalten. Bei allen Versuchen trat mit vitalen, gepflegten Pflanzen eine horizontale Brandausbreitung in nur sehr geringem Umfang und nach Abschalten des Brenners ein Selbstverlöschen auf. Auch ein direkter Vergleich zwischen jungen und alten Pflanzen sowie der Vergleich des jahreszeitlichen Einflusses zwischen Sommer und Winter ergab keinen signifikanten Unterschied bei vitalen, gepflegten Pflanzen. [7]

Ein entscheidender Unterschied lag bei getrockneten Pflanzen vor. Hier trat zu Beginn eine abrupte Wärmefreisetzung auf. Abgestorbene Pflanzen sowie ungepflegte Pflanzen mit einem hohen Anteil an Totholz stellen folglich den kritischsten Fall dar. Abbildung 5 stellt die Wärmefreisetzungsrate eines 42 Tage getrockneten, eines vitalen jungen und eines vitalen alten Efeus (*Hedera helix*) im Vergleich zu einer 9 mm Span- und einer 13 mm Sperrholzplatte dar. [7]

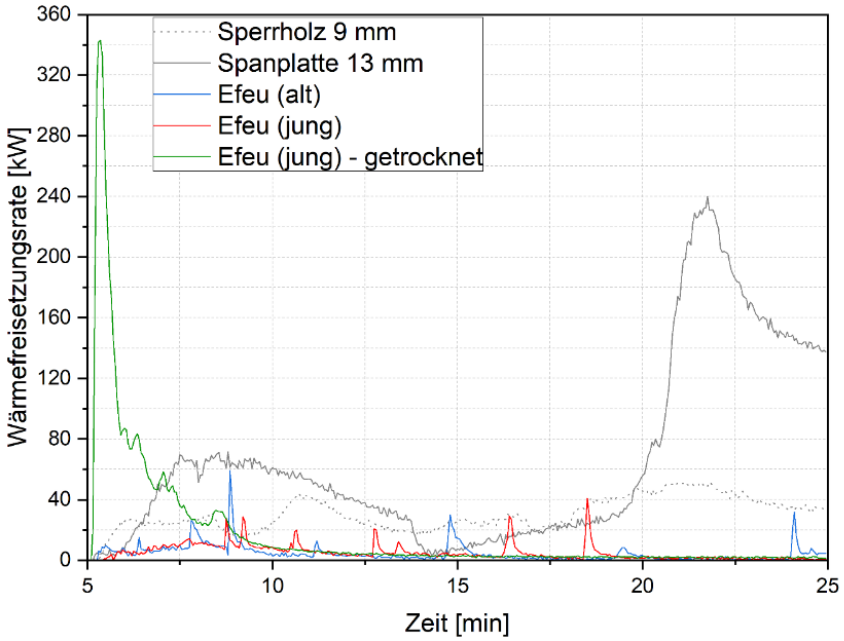


Abbildung 5:Wärmefreisetzungsrate eines 42 Tage getrockneten, eines vitalen jungen und eines vitalen alten Efeus im Vergleich zu einer 9 mm Span- und einer 13 mm Sperrholzplatte

Pflege und Wartung einer begrünten Fassade sind daher der wichtigste Faktor für die Aufrechterhaltung der Brandsicherheit. Totholz in Form von abgestorbenem Laub, Ästen oder Vogelnestern ist regelmäßig zu entfernen. Außerdem ist stetig zu prüfen, ob die Pflanzen noch vital sind und einen normalen Feuchtigkeitsgehalt aufweisen. Zusätzlich sind die Pflanzen regelmäßig zurückzuschneiden. Unkontrolliertes Wachstum kann zu viel Totholz führen – vor allem bei lichtfliehenden Pflanzen. [7],

Im nächsten Schritt ist es notwendig, die Erkenntnisse aus den mittelgroßen Versuchen im großen Maßstab zu überprüfen; insbesondere die vertikale Brandausbreitung ist hierbei genauer zu bewerten. [6], [7], [12]

5. Kombination von Holz- und Grünfassaden

Eine zentrale Frage für die Realisierung kombinierter Holz- und Grünfassaden sind die entstehenden Wechselwirkungen im Brandfall. Die konkrete Frage ist, ob der Wärmestrom einer brennenden begrünten Fassade ausreicht, um eine dahinterliegende Außenwandverkleidung aus Holz zu entzünden und ob eine begrünte Fassade im Bereich von Brandsperren [13], [14] von Holzfassaden zu einem Zündschnurreffekt führt.

Zur Untersuchung dieser Fragestellung wurden mittelmaßstäbliche Brandversuche durchgeführt [6], vgl. Abbildung 6.



Abbildung 6:Fotodokumentation des Brandversuchs Test 3 mit Holz- und Grünfassade zur 3. Prüfminute

Im Rahmen der Versuche wurde ein Abstand von 110 mm zwischen Rankgitter und Holzschalung gewählt. Diese Wahl soll eine möglichst kritische Brandeinwirkung der begrünten Fassade aufgrund des geringen Abstandes zur Holzschalung generieren. Bekannt ist, dass Wandabstände für bodengebundene Begrünungen von 50 mm bis 200 mm zur Kletterhilfe üblich sind [4], [5]. Diese Richtwerte orientieren sich an typischen mineralischen Außenwänden ohne Brandsperren. Ein ausreichender Mindestabstand zur Außenwand ist notwendig, da vor allem Pflanzen mit dichter Blattmasse einen Hitzestau begünstigen und folglich absterben können. Um eine Überhitzung zu vermeiden, muss eine Luftzirkulation an der Fassade durch einen ausreichenden Abstand der Rankgitter zur Außenwand uneingeschränkt möglich sein [5].

Für Holzfassaden an mehrgeschossigen Gebäuden sind in Deutschland Brandsperren [13], [14] in jedem Geschoss notwendig. Diese Brandsperren definieren einen Mindestabstand der Begrünung zur Außenwand, da die Pflanze auf der einen Seite nicht durch die Brandsperre hindurch wachsen kann und auf der anderen Seite ein ausreichender Mindestabstand zur Stahlbrandsperre nötig ist, um eine Überhitzung der Pflanze in diesem Bereich zu vermeiden. Mit Zunahme der Auskragung der Brandsperre nimmt auch der Abstand des Rankgitters zur Holzschalung zu; folglich nimmt die Einwirkung aus dem Abbrand der Begrünung aufgrund des größeren Abstandes ab. Dies ist der Grund, warum bei den durchgeführten und in [6] genauer beschriebenen Brandversuchen eine Nut-Feder-Holzschalung mit verhältnismäßig geringer Auskragung der Brandschutzabschottungen bzw. Brandsperren gewählt wurde.

Im Rahmen der Versuche wurde die Begrünung direkt bündig vor der 100 mm auskragenden Brandsperre vorbeigeführt. Weiter wurde der Bereich zwischen Holzschalung und Rankgitter flächig mit Pflanzentrieben eines über 15 Jahre alten Efeus (*Hedera helix*) gefüllt [6]. Die Wahl fiel auf Efeu, da er eine hohe Blattmasse und einen verhältnismäßig großen Triebdurchmesser hat. Die Versuchsanordnung und die Begrünungsdichte sollten eine ungepflegte und folglich mit Blick auf die Brandeinwirkung kritische Fassadenbegrünung simulieren, die zwar nicht über größere Mengen an Totholz verfügte, aber auch nicht regelmäßig zurückgeschnitten wurde.

Der mittelmaßstäbliche Versuchsaufbau ist in diesem Fall repräsentativ, da die Pflanzenmasse und -anordnung die eigentlich mögliche flächenbezogene Brandleistung bzw. maximale Wärmefreisetzung der Begrünung bestimmen und nicht die Größe des Versuchsstandes oder die Größe der Brandeinwirkung [6].

Bei beiden Versuchen mit angeordneter Begrünung stellte sich weder während der Versuchsdurchführung noch im Rahmen der anknüpfenden Beobachtungszeit ein selbständiger Brand auf der Holzschalung oberhalb der Brandsperre ein [6]. Dies lässt sich am besten visuell an den Holzschalungen nach Beendigung der Brandversuche beurteilen, siehe auszugsweise Abbildung 7.



Abbildung 7:Fotodokumentation der Holzschalung oberhalb der Brandsperre nach Beendigung des Versuches und der Beobachtungszeit für Test 3

Eine Verfärbung und Verkohlung stellte sich in Teilbereichen der Holzschalung aufgrund der Brandeinwirkung aus der Begrünung ein. Am intensivsten fiel die Verkohlung im mittleren, unteren Bereich der Fassade direkt oberhalb der Brandsperre aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich einzelne Holztriebe des mit Draht befestigten Efeus nach Abbrand der Blätter und Jungtriebe vom Rankgitter lösten und auf der Brandsperre abbrannten [6]. Auch diese Brandeinwirkung führte nicht zu einem selbständigen Brand der Holzfassade. Die direkte Brandeinwirkung auf den unteren Bereich der Holzschalung durch brennende Pflanzenteile auf der Brandsperre wäre für offene Schalungen infolge der dreiseitigen Brandeinwirkung auf den Holzquerschnitt kritischer als im vorliegenden Fall. Aufgrund des beschriebenen größeren Abstandes der Begrünung zur Holzschalung und der größeren Auskragungen der Brandsperren ist jedoch bei offenen Schalungen nicht mit einer Brandeinwirkung direkt an der Holzschalung zu rechnen [6].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein Abbrand der Begrünung im Rahmen der Versuche [6] nicht zu einer Entzündung der dahinterliegenden Holzfassade führte. Vorrausetzungen hierfür sind ein Mindestabstand von 110 mm zwischen Rankgitter und Holzschalung und eine regelmäßige Pflege und Wartung der Begrünung, bei der Totholz entfernt wird.

6. Abschließende Großbrandversuche

Die abschließenden Großbrandversuche dienen zum Beleg der innerhalb des Forschungsvorhabens FireSafeGreen [10] gewonnenen Erkenntnisse und als Grundlage zum Nachweis der brandschutztechnischen Schutzziele.

Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf der Bewertung der Brandausbreitung über die Fassadenbegrünung unter einer repräsentativen Brandeinwirkung. Darüber hinaus wurde untersucht, welchen Einfluss ein kurzzeitiger Wärmestrom auf die Außenwand, Fenster, Balkone, Dachüberstände und die dahinter liegenden Bereiche hat und welches Risiko damit verbunden ist. Besonderes Augenmerk lag auf dem Einfluss von lebenden und abgestorbenen (trockenen) Pflanzen auf die Brandausbreitung und das Brandverhalten an der Fassade. Eine konkrete Frage ist zum Beispiel, ob der Wärmestrom einer trockenen grünen

Fassade (worst case) ausreicht, um bei offenstehendem Fenster, die Einrichtung direkt an der Öffnung innerhalb der Nutzungseinheit zu entzünden. Darüber hinaus soll insbesondere die vertikale Brandausbreitung genauer bewertet werden.

Für die Versuche wurden insgesamt acht Brandversuche in drei unterschiedlichen Versuchsreihen durchgeführt. Diese drei Versuchsreihen umfassten eine flächige Anordnung g vor einer Außenwand, eine Anordnung mit Balkonen mit flächiger zentraler Brandeinwirkung sowie eine Anordnung mit Balkonen und einer Brandeinwirkung im Inneneck. Für jede Versuchsreihe wurde ein Referenzversuch ohne Begrünung (Pflanzen) durchgeführt, um den Einfluss der Begrünung genauer zu quantifizieren und die Ergebnisse zu validieren. In den Versuchsreihen wurde zusätzlich jeweils ein Versuch mit vitaler und einer mit getrockneter (toter) Begrünung durchgeführt, vgl. Abbildung 9 und Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht über die durchgeführten Versuche mit zugehöriger Brandlast

Versuch	Versuchsbeschreibung	Brandlast*
V0	Flächiger Versuch ohne Pflanzen (Referenzversuch)	4 × 35 kg (140 kg)
V1	Flächiger Versuch mit Pflanzen – vital	
V2	Flächiger Versuch mit Pflanzen – trocken	
V3	Balkonversuch ohne Pflanzen – Fläche (Referenzversuch)	3 × 35 kg (105 kg)
V4	Balkonversuch ohne Pflanzen – Ecke (Referenzversuch)	1 × 35 kg
V5	Balkonversuch mit Pflanzen – Fläche vital	3 × 35 kg (105 kg)
V6	Balkonversuch mit Pflanzen – Ecke vital	1 × 35 kg
V7	Balkonversuch mit Pflanzen – Fläche trocken	3 × 35 kg (105 kg)

* Holzkrippen aus gehobeltem Nadelschnittholz in Stäben mit Grundfläche von 500 mm × 500 mm mit kreuzweiser Anordnung (Verhältnis Holz:Luft = 1:1)

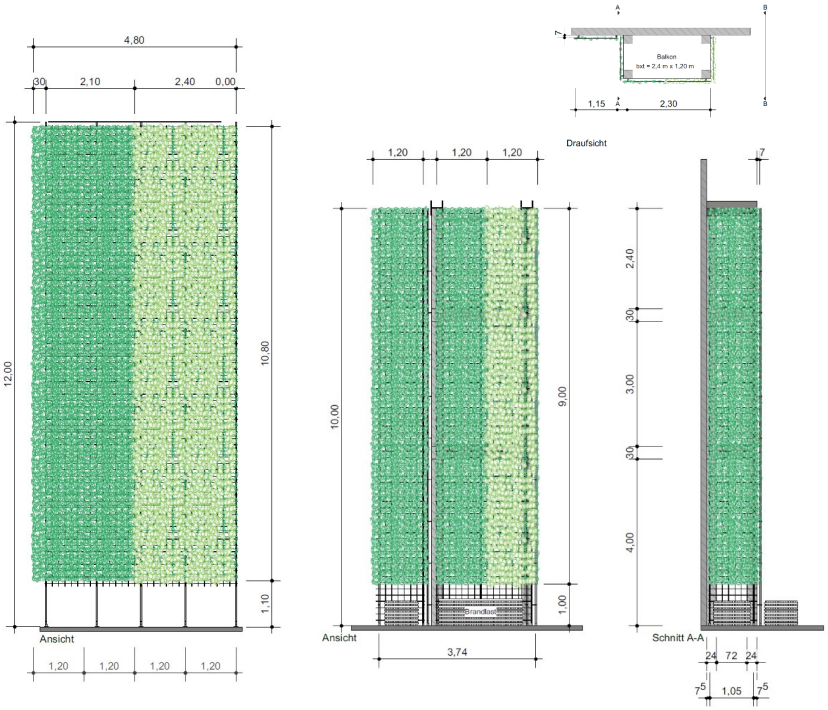


Abbildung 8: Links: Flächige Versuchsanordnung (12 m hoch) für die Versuche V0, V1 und V2; rechts: Balkenkonstruktion (10 m hoch) für die Versuche V3, V4, V5, V6 und V7 [15]

Als Begrünungen wurden am Rankgitter des Versuchsaufbaus *Hedera helix* mit einer Pflanzendichte (vital) von ca. 1,85 kg/m² (linke Seite, vgl. Abbildung 9) und *Euonymus fortunei* mit einer Pflanzendichte (vital) von ca. 2,55 kg/m² (rechte Seite, vgl. Abbildung 9) angeordnet.

Abbildung 9 zeigt den flächigen Versuch mit vitaler Begrünung (V1), den flächigen Versuch mit getrockneter (toter) Begrünung (V2) und den Balkonversuch mit Brandeinwirkung in der Ecke mit vitaler Begrünung (V4).



Abbildung 9: Links: Flächiger Versuch mit vitaler Begrünung (V1); Mitte: Flächiger Versuch mit getrockneter (toter) Begrünung (V2); Rechts: Balkonversuch mit Brandeinwirkung in der Ecke mit vitaler Begrünung (V4)

Bei den Brandversuchen mit Pflanzen, unabhängig von der Pflanzenart (*Hedera helix* bzw. *Euonymus fortunei*) und deren Feuchtegehalt, kam es zu einer vertikalen Brandausbreitung in Form von «Strohfeuern». Dabei beeinflusste der Feuchtegehalt deren Intensität wesentlich. Die Beobachtungen von [7] konnten somit auch im großmaßstäblichen Versuch bestätigt werden. Bei vitaler Begrünung direkt vor einer Außenwand konnte ein Abbrand der begrünten Fassade im Verhältnis des ca. 2,5-fachen der eigentlichen Primärflamme (Holzkrippen) festgestellt werden. Bei einer offenen Anordnung vor einem Balkon (Außenwand weiter entfernt) betrug der Faktor ca. 1,5. Generell konnte ein Selbstverlöschen der Begrünung beobachtet werden. Die detaillierte Versuchsauswertung ist zum aktuellen Zeitpunkt noch in Bearbeitung und kann im Anschluss [16] entnommen werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Für die brandschutztechnische Bewertung von begrünten Fassaden gibt es aktuell nur wenige Bewertungsgrundlagen. Mittelmaßstäbliche Brandversuche im Rahmen des Forschungsvorhabens FireSafeGreen [10] zeigten: Haupteinflussfaktor auf das Brandverhalten von Pflanzen ist der Feuchtigkeitsgehalt. Die Pflanzenart selbst spielt eine untergeordnete Rolle in Bezug auf das Brandverhalten und ist nach diesen Erkenntnissen, – zumindest für die untersuchten Varianten – zu vernachlässigen. Auch der direkte Vergleich von jungen und alten Pflanzen sowie der Vergleich eines jahreszeitlichen Einflusses von Sommer und Winter zeigte keinen signifikanten Unterschied bei vitalen, gepflegten Pflanzen. Im Verlauf von Bränden an begrünten Fassaden kommt es zu kurzen Wärmefreisetzungsspitzen. Diese Spitzen werden als «Strohfeuer» bezeichnet. Sie entstehen, wenn Teile der Pflanzen durch die Brandeinwirkung austrocknen und sich dann schlagartig entzünden. Bei vitalen, gepflegten Pflanzen tritt eine horizontale Brandausbreitung nur in sehr geringem Umfang auf. Weiter verhalten sich vitale begrünte Fassaden nach Ende der Primärbrandeinwirkung selbstverlöschend. [6], [7], [12]
Für eine Kombination aus Holz- und begrünter Fassade lässt sich festhalten, dass ein Abbrand der Begrünung nicht zu einer Entzündung der dahinterliegenden Holzfassade führt. Vorrausetzung ist ein Mindestabstand von 110 mm zwischen Rankgitter und Holzschalung und eine regelmäßige Pflege und Wartung der Begrünung. [6]

Im nächsten Schritt gilt es, die Definition der angemessenen Pflege und Wartung für brandsichere begrünte Fassade tiefergehend auszuarbeiten. Zu klären ist, welche Intervalle notwendig sind und wann die unterschiedlichen Pflegemaßnahmen erforderlich sind.

8. Förderhinweis

Dieses Projekt wird gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen aus Mitteln der Zukunft Bau Forschungsförderung.

9. Literatur

[1] Alexandri, E.; Jones, P. (2008) Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. In: Building and Environment 43:480–493. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.055

[2] Perini, K.; Ottelé, M.; et al. (2011) Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. In: Building and Environment 46:2287–2294. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009

[3] Köhler, M.; Ansel, W. (2012) Handbuch Bauwerksbegrünung. Planung - Konstruktion - Ausführung. Köln: Rudolf Müller.

[4] Mahabadi, M.; Althaus, C.; et al. (2018) Fassadenbegrünungs-richtlinien - Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen. Hg. v. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. - FLL.

[5] Pfoser, N. (2018) Vertikale Begrünung. Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit oder ohne natürlichen Boden-/Bodenwasseranschluss. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (Fachbibliothek grün).

[6] Engel, T. (2023) Brandschutz für biogene Fassaden – Experimentelle Untersuchungen als Grundlage brandschutztechnischer Prinzipien, Dissertation, Technische Universität München https://mediatum.ub.tum.de/?id=1715368

[7] Engel, T.; Werther, N. (2024) Fire Safety for Green Façades: Part 1: Basics, State-of-the-Art Research and Experimental Investigation of Plant Flammability. Fire Technology https://doi.org/10.1007/s10694-024-01566-0

[8] ÖNORM B 3800-5:2013. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 5: Brandverhalten von Fassaden - Anforderungen, Prüfungen und Beurteilungen.

[9] DIN 4102-20:2017-10. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen.

[10] Forschungsvorhaben FireSafeGreen, Homepage http://www.firesafegreen.de

[11] EN 13823:2020-09. Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen.

[12] Engel, T. (2023). Brandverhalten von Grünfassaden. OIB aktuell – Das Fachmagazin für Baurecht und Technik, Heft 2.2023 – Herausgeber: Österreichisches Institut für Bautechnik, S. 14-18

[13] MHolzBauRL, vom Oktober 2020 (21.06.2021): Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise.

[14] Engel, T., Werther, N. (2023) Structural Means for Fire-Safe Wooden Façade Design. Fire Technology 59:117–151. https://doi.org/10.1007/s10694-021-01174-2

[15] Kahler, J. (2024) Untersuchung der brandschutztechnischen Anwendbarkeit von begrünten Fassaden an mehrgeschossigen Gebäuden bis zur Hochhausgrenze

[16] Engel, T. (2024) Fire Safety for Green Façades: Part 2: Full-Scale Façade Fire Tests and Means for Fire-Safe Green Façade Design for Climbing Plants on Trellises. Fire Technology [Manuscript in preparation]

Darstellung des Brandverhaltens von Holzaussenbauteilen mittels numerisch gestützter Rechenverfahren

Florent Lushta
BIQS Brandschutzingenieure AG
Zürich, Schweiz



Gereon Schiffer
BIQS Brandschutzingenieure AG
Zürich, Schweiz



Darstellung des Brandverhaltens von Holzaussenbauteilen mittels numerisch gestützter Rechenverfahren

1. Einleitung

Im Rahmen der durchgeführten Studie wurde das Brandverhalten von Holzbauteilen an Aussenwänden mit Hilfe von numerisch gestützten Rechenverfahren untersucht. Die Zielsetzung war es, das Abbrandverhalten des Holzbaustoffes zu modellieren. Grundlage für die Validierung der verwendeten Modelle bildeten die Ergebnisse realer Brandversuche. Bei der Modellentwicklung wurden verschiedene Randbedingungen wie der Fassadenaufbau, das Strömungsverhalten, der Wärmetransport und das thermochemische Verhalten berücksichtigt.

2. Hintergrund und Motivation

Der Anteil an Bauvorhaben in Holzbauweise hat in den letzten Jahren zugenommen, was sich unter anderem mit dem gesteigerten Umweltbewusstsein der Anwender und die Nachhaltigkeit von Holz als Baustoff begründen lässt. Aus brandschutztechnischer Sicht wird der Einsatz von Holzbauteilen nicht immer unkritisch betrachtet. Dies spiegelt sich auch in gesetzlichen Vorschriften wider. Die durchgeführte Studie soll dazu beitragen, das Brandverhalten von Holzfassaden besser zu verstehen und die Entwicklung mögliche Nachweisverfahren zu unterstützen, welche in der Praxis als Ingenieurmethode angewendet werden könnte.

3. Methodik und Durchführung

Die Vergleichsstudie basiert auf Realbrandversuchen, die von der Lignum Holzwirtschaft Schweiz durchgeführt wurden. Diese Versuche dienten als Grundlage für die Modellierung und Simulation der Brandausbreitung.

Im Rahmen der Realbrandversuche wurden in einem Prüfstand verschiedene Fassadenausschnitte mittels eines genormten Prüffeuers entzündet. Bei dem gewählten Fassadenausschnitt handelt es sich um eine ca. 3 m breite, 8 m hohe und 2 cm starke Bretterschalung, welche mit einem 3 cm breiten Luftspalt vor einer Wand aufliegt. Dabei wurden die Temperatur, Luftgeschwindigkeit und das Schadensbild vor der Fassade sowie innerhalb der Hinterlüftung ausgewertet.

Für die Modellierung und Simulation wurden die beiden CFD-Programme «Fire Dynamic Simulator – FDS» und «Star CCM+» eingesetzt.

Eine besondere Herausforderung im Rahmen dieser Studie stellte die Modellierung der Pyrolyse von Holz dar. Während FDS bereits über ein implementiertes Rechenmodell zur Berücksichtigung der Pyrolyse fester Baustoffe verfügt, musste ein eben solches für Star CCM+ erst im Rahmen der Studie entwickelt werden.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die mit FDS berechneten Ergebnisse konnten die beobachteten Phänomene aus den Realbrandversuchen nur eingeschränkt reproduzieren. Während die berechnete Temperaturverteilung im Bereich vor der Fassade stark der im Versuch gemessenen ähnelt, weichen das berechnete Strömungsbild und die Temperaturverteilung in der Hinterlüftungsebene von den Ergebnissen aus den Realbrandversuchen signifikant ab (vgl. Abb. 1). Diese Beobachtungen lassen sich vor allem mit dem verwendeten Turbulenzmodell und dessen Abhängigkeit zu der filigranen Geometrie im Bereich der Hinterlüftungsebene erklären, welche sehr fein numerisch sehr fein zu diskretisieren wäre. Des Weiteren liessen die Berechnungen mit FDS kaum Rückschlüsse auf das Schadensbild zu.

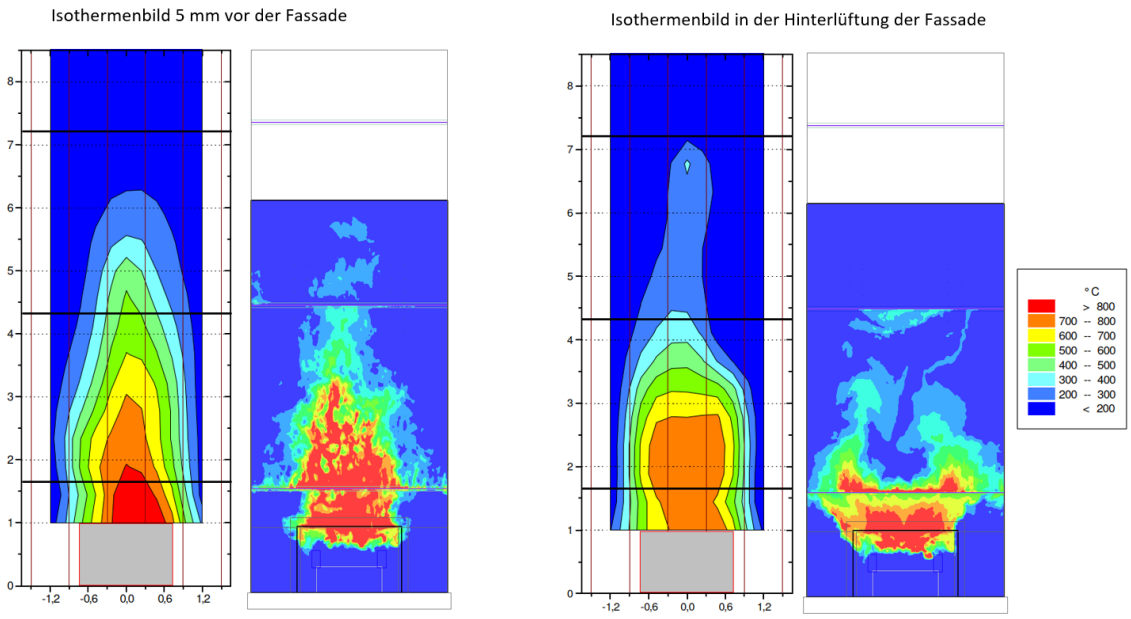


Abbildung 1: Qualitativer Vergleich der Temperaturen im Versuch mit denen von FDS.

Die Simulationen mit Star CCM+ mit dem entwickelten Pyrolysemodell konnten wichtige physikalische Phänomene reproduzieren, die auch in den Realversuchen beobachtet wurden. So konnten die im Versuch gemessenen Temperaturen teilweise mit deutlicher Übereinstimmung im Rahmen der Simulationen reproduziert werden. Diese vielversprechenden Ergebnisse konnten ebenfalls an einigen Stellen innerhalb der 3 cm starken Hinterlüftungsschicht erzielt werden. Dennoch konnten auch teilweise Abweichungen beobachtet werden. Diese Abweichungen können mit dem berechneten Strömungsverhalten begründet werden, welches aufgrund des statischen Modells der Bretterschalung von den real beobachteten, Phänomen abweicht (siehe auch Abb. 2). Das tatsächliche Brandverhalten von Holz ist eben nicht statisch, da mit zunehmendem Verbrennungsfortschritt die geometrische Form der Fassade sich verändert, was wiederum zu einer Beeinflussung der Strömung in diesem Bereich führt.

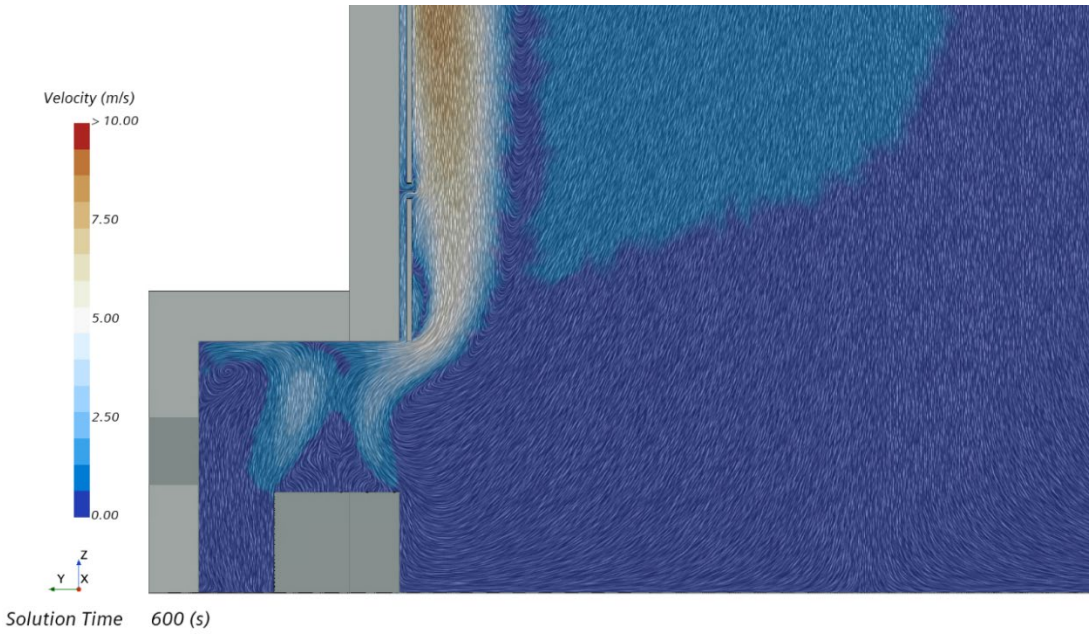


Abbildung 2: Strömungsgeschwindigkeiten 600 Sekunden nach Versuchsbeginn (Star CCM+)

Mit Hilfe des entwickelten Pyrolysemodells konnte nicht nur die freigesetzte Energie infolge des verbrannten Holzes berechnet werden, sondern ebenfalls das sich einstellende Schadensbild als Brandfolge. Hierfür wurde der Fortschritt der Pyrolyse für jede einzelne Zelle innerhalb des numerischen Gitters der Fassade abgefragt.

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass der eingestellte Schaden Qualitativ bereits deutlich erfasst werden kann. Die berechneten Schadensbilder sind in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt.

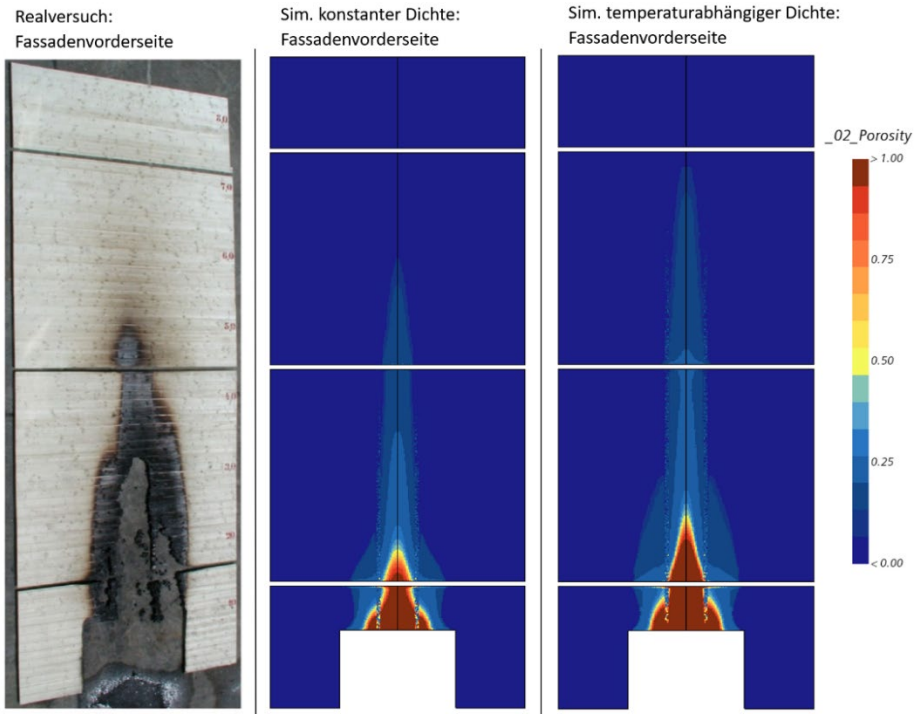


Abbildung 3: Schadensbilder der Fassadenfront aus den Realversuchen in Gegenüberstellung zum berechneten Schaden

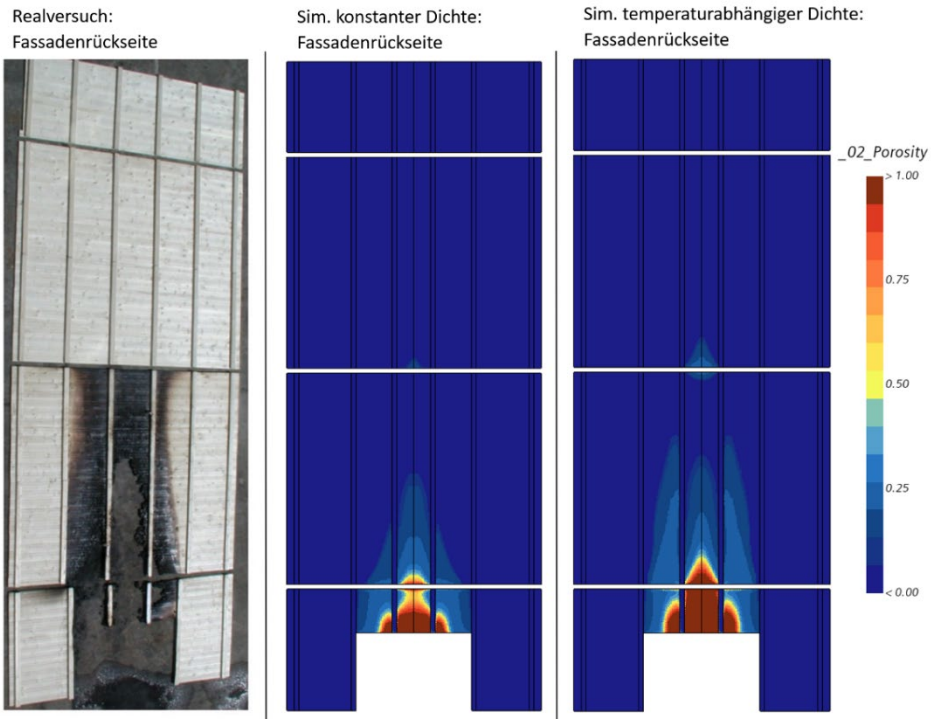


Abbildung 4: Schadensbilder der Fassadenrückseite aus den Realversuchen in Gegenüberstellung zum berechneten Schaden

5. Fazit und Ausblick

Die Studie verdeutlicht, dass neben den zahlreichen Herausforderungen die Wahl der Simulationssoftware und die Submodelle für die Strahlung, Turbulenz, Pyrolyse, Gasverbrennung, Reibung etc. entscheidend für die Genauigkeit der Ergebnisse ist.
Während FDS für einige Aspekte gut geeignet war, bot Star CCM+ vielversprechende Möglichkeiten für die Simulation des Brandverhaltens von Holzfassaden mit Hilfe von eigens entwickelten Submodellen. Dennoch bedarf es weiterer Studien, um die Robustheit und Zuverlässigkeit der Simulationen sicherzustellen. Insbesondere wäre die numerische Erfassung der verbrannten Holzbestandteile noch vollständig zu lösen, um oben beschriebene Verfälschungen im Strömungsbild zu minimieren resp. auszuschliessen.

Die numerische Simulation von Holzfassaden hat für die Praxis das Potenzial, künftig als gleichwertiges Nachweisverfahren neben physikalischen Modellen (Realbrandversuche) als Ingenieurmethode des Brandschutzes verwendet zu werden. Es besteht auch grosses Potenzial für weitere ingenieurmässige Anwendungen in verschiedenen Bereichen wie die numerische Simulation von Bränden bei begrünten Fassaden oder solchen mit Photovoltaik. Hierfür sind sicherlich weitere Forschungen und Standardisierung erforderlich, um dieses Verfahren mit ausreichender Genauigkeit in der Praxis anzuwenden.

GEBÄUDE – technik | bauteile | materialien

WÄRMEPUMPE – die Wärmeversorgung der Zukunft?

Wärmepumpe ist nicht gleich Wärmepumpe – eine Systemübersicht

Uli Spindler
Technische Hochschule Rosenheim
Energie- und Gebäudetechnologie
Rosenheim, Deutschland



Wärmepumpe ist nicht gleich Wärme-pumpe – eine Systemübersicht

Während die Wärmepumpe in anderen Ländern wie Schweiz, Österreich und vor allem Skandinavien längst etabliert ist, wird in Deutschland Ihre schnelle Einführung in der Bestandssanierung regelrecht bekämpft – leider auch von führenden Politikern. Da die relevanten Studien [z.B. 1, 2, 3] zur Klimaneutralität Deutschlands aber einen großflächigen Austausch von fossilen Heizkesseln mit Wärmepumpen voraussetzen, muss man hier wohl von Populismus wider besseren Wissens sprechen, da kaum vorstellbar ist, dass in der Politik diese Studien nicht bekannt sind.

Hatte im Jahr 2023 zuerst die Gasmangellage durch den Ukrainekrieg zu Rekordabsätzen bei den Wärmepumpen geführt, so führte die nachfolgende Debatte der Neufassung des GEG im 2. Halbjahr zu Rekordverkäufen von Öl- und Gaskesseln [4] und einem Einbruch bei den Wärmepumpenverkäufen. Der Absatz von Ölkesseln hat sich in 2023 sogar mehr als verdoppelt. Dem Klimaschutz und den Klimazielen Deutschlands hat diese Debatte also einen Bärendienst erwiesen.

1. Treibhausgas-Emissionen verschiedener Heizungen

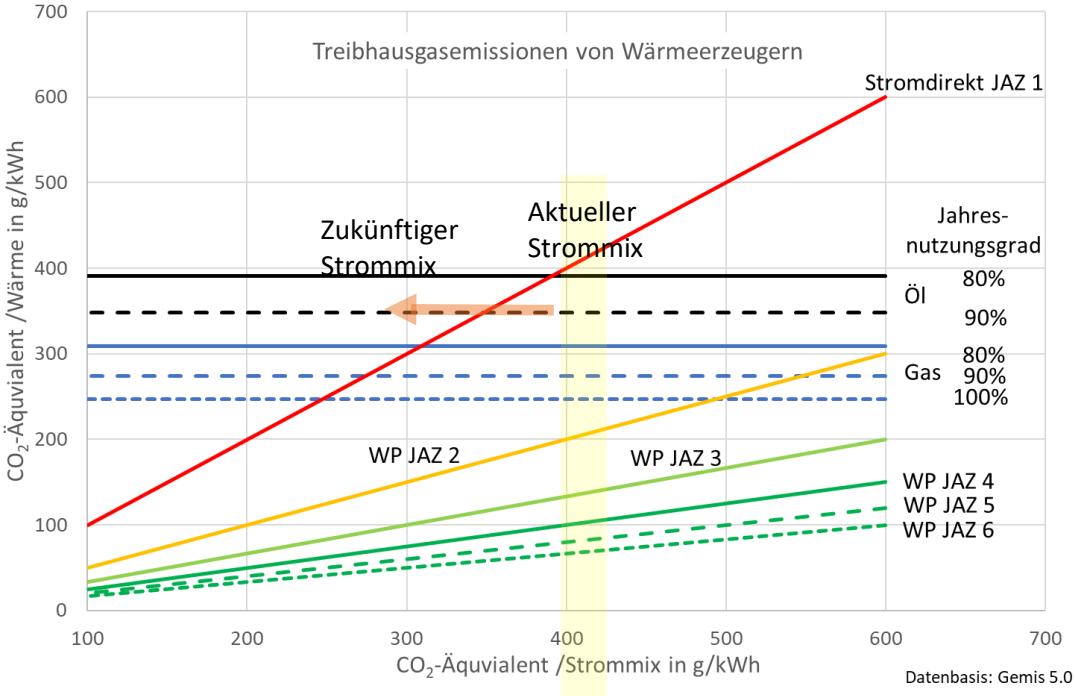


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen für Wärmeerzeugung mit verschiedenen Wärmeerzeugern in Abhängigkeit der Treibhausgasemissionen des Strommixes (Öl = Ölkessel, Gas = Gaskessel, WP = Wärmepumpe)

Warum ist die Wärmepumpe eigentlich so wichtig für den Klimaschutz? Das lässt sich mit einem Blick auf die Abbildung 1 erkennen. Dort sind die Treibhausgasemissionen verschiedener fossiler Kessel und unterschiedlich effizienter Wärmepumpen in Abhängigkeit vom Strommix aufgetragen. Leicht ist zu erkennen, dass beim derzeitigen deutschen Strommix (2021), der etwa bei 400 g Emissionen/kWh liegt [5], selbst eine sehr schlechte Wärmepumpe mit einer JAZ von 2 gegenüber einem Niedertemperatur-Ölkessel ($\eta = 80\%$) schon eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von etwa 50% ergibt. Bei einem Einfamilienhaus mit einem Ölverbrauch von 3500 l ergibt das mit Treibhausgas(THG)-Daten aus Gemis 5.0 [5] eine Reduktion in den THG-Emissionen von 11,1 t auf 5,6 t jährlich. Und mit steigendem Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung werden die THG-Emissionen einer Wärmepumpenheizung automatisch immer weniger.

Während die THG-Emissionen gut abzuschätzen sind, lässt sich im derzeitigen Energiemarkt sehr schlecht prognostizieren, wie sich die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen gegenüber Heizkesseln entwickeln wird. Bei den derzeitigen Energiepreisen (März 2024: WP-Strom ca. 21 ct/kWh, Öl ca. 105 ct/l) sind die Energiekosten einer mäßigen Wärmepumpe mit JAZ 2,5 etwa 20% und einer guten mit JAZ 4 etwa 50% niedriger als bei einem alten Niedertemperatur-Ölkessel. Da die Preise für Öl und Gas durch die schon vor Jahren beschlossene CO_2-Bepreisung steigen, wird der Betriebskostenvorteil der Wärmepumpe vermutlich eher größer werden. Allerdings ist im Moment noch nicht klar, wie die Netzausbaukosten auf den Strompreis umgelegt werden.

Als Alternativen zur Wärmepumpe werden in der politischen Diskussion immer noch grüner Wasserstoff und Holz angeführt. Wasserstoff ist nach den Prognosen vieler Studien mindestens in den nächsten 15 – 20 Jahren nicht in ausreichendem Maße kostengünstig verfügbar, um damit bezahlbares Heizen zu ermöglichen [6]. Die Aussagen zu Holz als Brennstoff sind ähnlich emotional wie die zu Wärmepumpen. Nüchtern betrachtet ist klar, dass in Deutschland das nachhaltig zu nutzende Brennholz-Potential bei weitem nicht ausreicht, um den Bedarf an Heizenergie zu decken. Der Nettozuwachs der deutschen Wälder wurde schon 2020 durch Entnahme und Verluste vollständig aufgebraucht [7]. Der Zuwachs der deutschen Wälder (ca. 100 Mill. m³ [7]) würde in Energie umgerechnet etwa 230 TWh ergeben, könnte also selbst bei vollständiger energetischer Verwertung den Bedarf von etwa 780 TWh an Endenergie für Warmwasser und Raumwärme in Deutschland [8] nicht abdecken.

Ein weiterer Ausbau von Holzheizungen würde zu vermehrten Importen, darunter auch nicht nachhaltiges Holz, und steigenden Preisen führen, die auch auf die Preise von Bauholz rückwirken werden. Besonders kritisch ist hier die Planung vieler Fernwärmenetzbetreiber zu sehen, die im Rahmen der zukünftigen Dekarbonisierung von fossilen Brennstoffen auf Biomasseverbrennung umsteigen wollen.

2. Wärmepumpe im Bestand, wie soll das gehen?

Die Wärmepumpe ist also für das Erreichen der Treibhausgasneutralität sehr wichtig. Es gilt also, das Vorurteil auszuleuchten, dass Wärmepumpen in Bestandsgebäuden nicht funktionieren würden und wahre Stromfresser sind. Es ist selbstverständlich, dass in einem schlecht gedämmten Bestandsgebäude, das vorher viel Öl oder Gas benötigt hat, auch eine Wärmepumpe nicht verhindern kann, dass das Gebäude einen hohen Wärmebedarf hat und somit auch die Wärmepumpe einen entsprechenden Strombedarf haben muss. Und wie bei einem Heizkessel kann und muss auch die Heizleistung der Wärmepumpe passend zum Gebäude gewählt werden. In einem schlecht gedämmten Gebäude muss eine ausreichend große Wärmepumpe verbaut werden, damit sie das Gebäude beheizen kann.

Aber es gibt hier noch einen weiteren wichtigen Punkt, den man nicht unterschlagen darf. Die Effizienz von Wärmepumpen hängt aus physikalischen Gründen davon ab, wie hoch sie die Wärme «pumpen» muss, d.h. welchen Temperaturunterschied zwischen der Umweltwärmequelle und dem Heizungswasser sie bereitstellen muss. So sinkt aus physikalischen Gründen bei einer Erhöhung der Heizwassertemperatur von 35°C auf 45°C die Effizienz einer Wärmepumpe um etwa 20% und bei 55°C um etwa 35%.

Bei einer Flächenheizung wie z.B. einer Fußbodenheizung mit einer maximalen Vorlauftemperatur zwischen 35°C und 45°C arbeitet also eine Wärmepumpe hocheffizient, unabhängig vom Dämmstandart des Gebäudes. Heizkörperheizungen dagegen sind normalerweise für höhere Temperaturen ausgelegt, so dass man hier, abhängig von der benötigten Vorlauftemperatur, mit einer verringerten Effizienz leben muss. Wichtig ist hierbei, dass die Vorlauftemperatur bei Heizungen gleitend gefahren wird und nur an sehr wenigen sehr kalten Tagen die Auslegungstemperatur benötigt wird. Für die Effizienz relevant ist daher die mit der Heizlast gewichtete mittlere Vorlauftemperatur. Für ein Heizsystem mit einer 55°C Auslegung beträgt sie etwa 45°C. Die Effizienzeinbuße fällt also deutlich geringer aus, als die Auslegungstemperaturen vermuten lassen.

Die Effizienz einer Wärmepumpenheizung hängt also nicht vom Alter des Gebäudes ab, sondern vom installierten Heizungssystem. Allerdings sind im Neubau Fußbodenheizungen weiter verbreitet als im Bestand und Heizkörper sind üblicherweise auf niedrigere Temperaturen ausgelegt. Verschiedene Studien haben aber gezeigt, dass auch höhere Temperaturen im Bestandsbau mit einfachen Maßnahmen wie Austausch einzelner Heizkörper auf ein wärmepumpen-taugliches Niveau abgesenkt werden können [9, 10]. Ursache dafür sind einerseits eine häufige Überdimensionierung der Heizkörper und anderseits die fast immer bereits erfolgten kleineren Sanierungsmaßnahmen wie z.B. Fenstertausch.

Wenn alles so problemlos funktioniert, woher stammt dann das Vorurteil? Dafür gibt es in der Vergangenheit zwei sich verstärkende Hauptursachen. Fehler bei der Installation und noch nicht so weit optimierte Technik wie heute. Um optimal zu arbeiten, brauchen Wärmepumpen ein auf sie abgestimmtes Heizsystem inklusive der Hydraulik. Hier wurde inzwischen viel Wissen aufgebaut, aber man muss leider feststellen, dass es noch zu viele Heizungsbauer gibt, die sich dieses Wissen noch nicht angeeignet haben. Auf die Weiterentwicklung der Technik wird im folgenden Kapitel eingegangen.

3. Technikvergleich

3.1. Maximale Vorlauftemperatur der Wärmepumpe

Ältere Wärmepumpen erreichten oft nur Temperaturen bis etwa 55°C, manche sogar noch darunter. Wurde dann noch die Warmwasserbereitung ungünstig ausgeführt, wurde bei zahlreichen Wärmepumpen das Warmwasser ineffizient mit dem Heizstab bereitet. Gleiches passierte bei zu hoch eingestellten Vorlauftemperaturen im Heizbetrieb. Moderne Wärmepumpen erreichen heute üblicherweise Vorlauftemperaturen von 62°C. Damit kann Warmwasser problemlos auch ohne Heizstab auf Legionellen-sichere 60°C erwärmt werden. Wärmepumpen mit dem Kältemittel Propan erreichen sogar 70°C. Damit wären auch sehr hohe Vorlauftemperaturen im Wärmepumpenbetrieb zwar noch möglich, aber wie vorher ausgeführt, sollten dann besser Maßnahmen zur Absenkung der Vorlauftemperatur durchgeführt werden. Bei gut ausgeführten Wärmepumpenheizungen sollte der Heizstab gar nicht oder nur noch zur Spitzenlastabdeckung an vereinzelten extrem kalten Tagen betrieben werden. Eine ausführliche Behandlung des Heizstabsthemas findet sich im Abschlussbericht Wärmepumpen in Bestandsgebäuden des Fraunhofer ISE [11].

3.2. Leistungsregelung

Den größten Unterschied für Auslegung und Betrieb macht die Leistungsregelung aus. Während sogenannte Fix-Speed-WP nur durch Takten geregelt werden können, erlaubt die Drehzahlregelung über Frequenzumrichter einen modulierenden Betrieb von etwa 20% – 100% Leistung. Obwohl Frequenzumrichter einen Verlust von etwa 5% haben, wird dies in der Praxis durch mehrere positive Effekte auf den COP mehr als überkompensiert.

Bei jedem Start des Kompressors muss sich der WP-Kreis erst neu einregeln. Diese Anlaufphase reduziert den Wirkungsgrad. Beim modulierenden Betrieb hingegen steigt mit reduzierter Leistung die Effizienz und erreicht das Maximum bei etwa 40% – 50% Leistung (siehe Abb. 2). Ursache dafür sind die geringeren Leistungen an den Wärmeübertragern und damit ein geringer interner Temperaturhub des WP-Kreises. Das bedeutet in der Praxis, dass im Teillastbetrieb, in dem der Großteil des Heizwärmebedarfs anfällt, die Effizienz modulierender Wärmepumpen steigt, während die der fix-speed Wärmepumpen sinkt. In der Heizklimazone 13 fallen etwa 45% des Heizwärmebedarfs zwischen 0°C – 5°C an und etwa 25% zwischen 5°C – 10°C. Bei der gezeigten Wärmepumpe beträgt die Effizienzsteigerung bei 2°C Außentemperatur bis zu 20% und bei 7°C sogar bis zu 23%. Für Wärmepumpen anderer Hersteller sind ähnlich Verläufe zu erwarten, aber kaum öffentlich zugängliche Daten verfügbar.

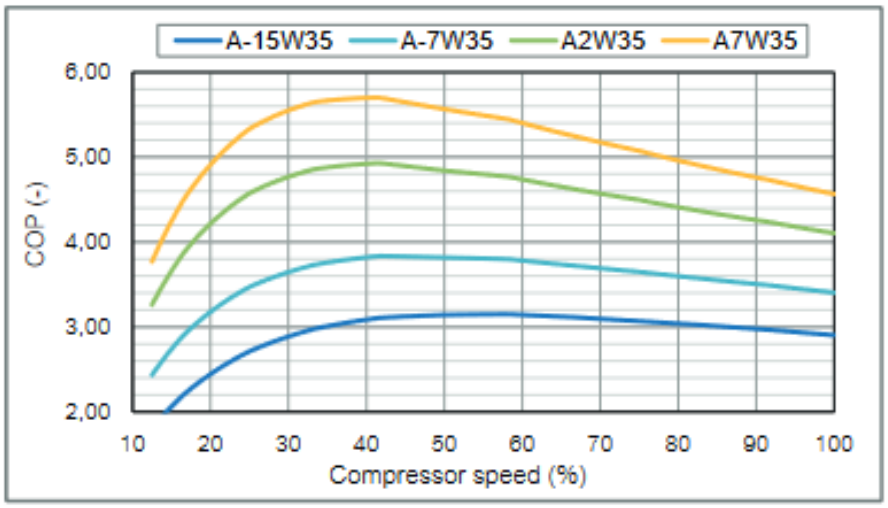


Abbildung 2: COP einer modulierenden Wärmepumpe über der relativen Kompressordrehzahl aufgetragen, Quelle Datenblatt Ecoforest ecoGEO+ 1-6 PRO

Bei Luftwärmepumpen wird dieser Effekt noch verstärkt, da bei Wärmepumpen physikalisch bedingt mit der Wärmequellentemperatur auch die Heizleistung steigt, sich also gegenläufig zur benötigten Heizleistung verhält. In einem Auslegungsdiagramm (Abb. 3a) ist das exemplarisch dargestellt mit den Leistungskurven einer fix-speed Wärmepumpe (schwarze Linien) und dem Wärmebedarf eines Wohnhauses inkl. Warmwasserbereitung in Rot. Man sieht deutlich, dass die Wärmepumpe schon im Bereich 0°C bis 5°C deutlich Takten muss. Im gezeigten Beispiel ist die Wärmepumpe mit einem Bivalenzpunkt von –4°C verhältnismäßig groß ausgelegt und braucht einen Speicher, damit ihre Lebensdauer durch häufiges Takten nicht reduziert wird.

Demgegenüber ist in Abb. 3b das Diagramm einer drehzahlgeregelten Maschine dargestellt. Hier sind für die Wärmepumpe eine minimale und eine maximale Leistungskurve dargestellt. Man sieht, dass die Wärmepumpe nun deutlich größer ausgelegt werden kann und trotzdem erst bei viel höheren Außentemperaturen im Taktbetrieb läuft. Es kann quasi monovalent, wie im Beispiel mit einem Bivalenzpunkt von -12°C, ausgelegt werden oder sogar monovalent. Dies reduziert den Deckungsanteil des Heizstabes im Beispiel von etwa 4% auf etwa 0,5%. Die Verschlechterung der Jahresarbeitszahl durch den Heizstab beträgt etwa 3% oder bei der modulierenden Maschine nur etwa 0,3%. Mit einer Verschiebung des Bivalenzpunktes zu höheren Temperaturen nimmt die Effizienzeinbuße schnell zu.

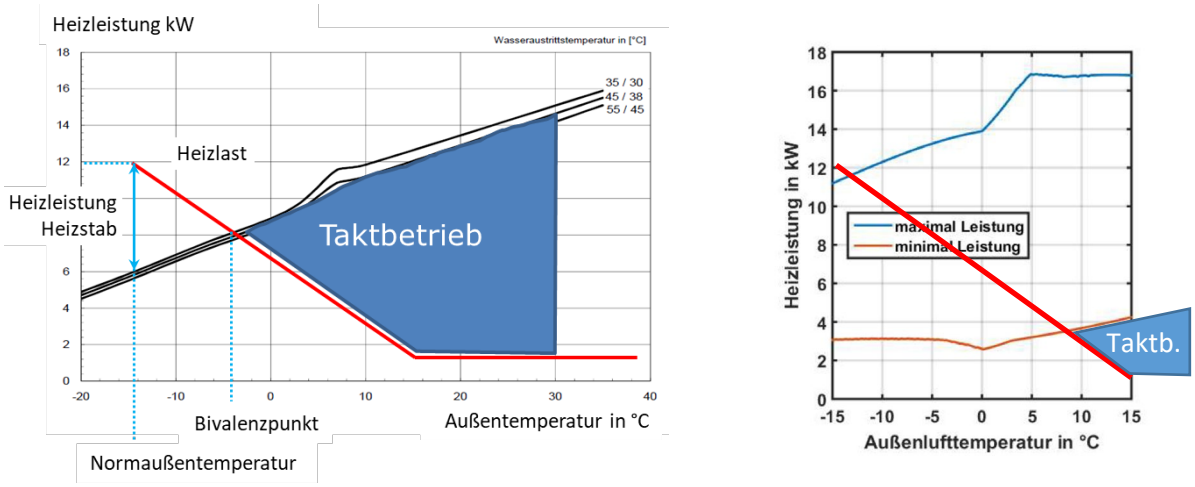


Abbildung 3: a) Beispiel Auslegung einer fix-speed (links) und b) einer modulierenden (rechts) Wärmepumpe für das gleiche Gebäude

Ein weiterer Vorteil modulierender Wärmepumpen hängt mit der Temperaturspreizung zwischen Vorlauf und Rücklauf zusammen. Da bei den Wärmepumpen die Effizienz von der Heizungsvorlauftemperatur abhängt, ist eine geringe Spreizung von etwa 5 K – 7 K anzustreben. Die Spreizung wird bestimmt durch die Leistung der Wärmepumpe und dem

Volumenstrom des Heizwassers. Bei einer nicht modulierenden Wärmepumpe nimmt die Heizleistung von -10°C bis 10°C um 50% - 60% zu (s. Abb. 3 links) und entsprechend nimmt die Spreizung zu, da der Volumenstrom nicht ohne weiteres erhöht werden kann. Dies wiederum bewirkt eine höhere Vorlauftemperatur als nötig. Pro Kelvin Erhöhung nimmt die Effizienz einer Wärmepumpe überschlägig um 2,5% ab. Modulierende Wärmepumpen passen ihre Leistung an, so dass sich die Spreizung nicht erhöht. Erschwerend kommt hinzu, dass durch die geforderten Einzelraumregelungen der Volumenstrom durch Abregeln einzelner Heizkreise und -körper weiter reduziert wird und so der Effekt noch verstärkt wird.

Generell ist festzustellen, dass die Hydraulik der Heizungsanlage so gestaltet sein muss, dass die Vorlauftemperatur nicht unnötig erhöht wird. Ein hydraulischer Abgleich mit Anpassung der Heizkurve ist also bei Wärmepumpen für eine optimierte Effizienz zwingend erforderlich.
In Summe können sich über die verschiedenen Effekte die Effizienzvorteile von modulierenden Luftwärmepumpen also schnell auf 30% – 50% steigern.

Zwei weitere Vorteile von modulierende LWP beeinflussen zwar die Effizienz nicht, sind aber wichtige Verkaufsargumente. Im leistungsreduzierten Betrieb sind die Schallemissionen der Maschinen reduziert, so dass im Frühjahr und Herbst die Maschinen weniger Geräusche erzeugen. Also gerade in der Zeit, in der man sich schon draußen aufhält, aber auch noch ein relevanter Heizbetrieb stattfindet. Zusätzlich kann bei den modulierende LWP im Gegensatz zu den fix-speed-LWP üblicherweise ein schallreduzierter Betrieb eingestellt werden, der bei den meisten Maschinen zwischen 6 und 10 dB(A) leiser ist. So können in kritischen Wohnlagen die geforderten Schallwerte der TA Lärm meistens eingehalten werden. Die allerbesten Maschinen haben inzwischen im reduzierten Betrieb einen Schalleistungspegel von unter 50 dB(A) und sind damit im Abstand von wenigen Metern kaum noch hörbar.

Der andere Vorteil der Leistungsregelung ergibt sich bei PV-Nutzung. Hier kann der Betrieb der Wärmepumpe in Abhängigkeit des PV-Überschusses gefahren werden und so den Eigenverbrauch erhöhen. Aber selbst ohne eine PV-Überschusssteuerung erhöht sich der Eigenverbrauch durch den gleichmäßig niedrigeren Stromverbrauch der Wärmepumpe im Gegensatz zu den kurzen Lastspitzen einer taktenden Wärmepumpe, die immer in Volllast läuft. In den Monitoringdaten in Abb. 4 ist dies gut zu erkennen. Es handelt sich links und rechts um das gleiche Gebäude, in dem eine fix-speed LWP durch eine modulierende LWP kleinerer Leistung ersetzt wurde. Deutlich ist das unterschiedliche Regelverhalten der beiden Wärmepumpen zu sehen (Achtung: unterschiedliche Skala der Y-Achse).

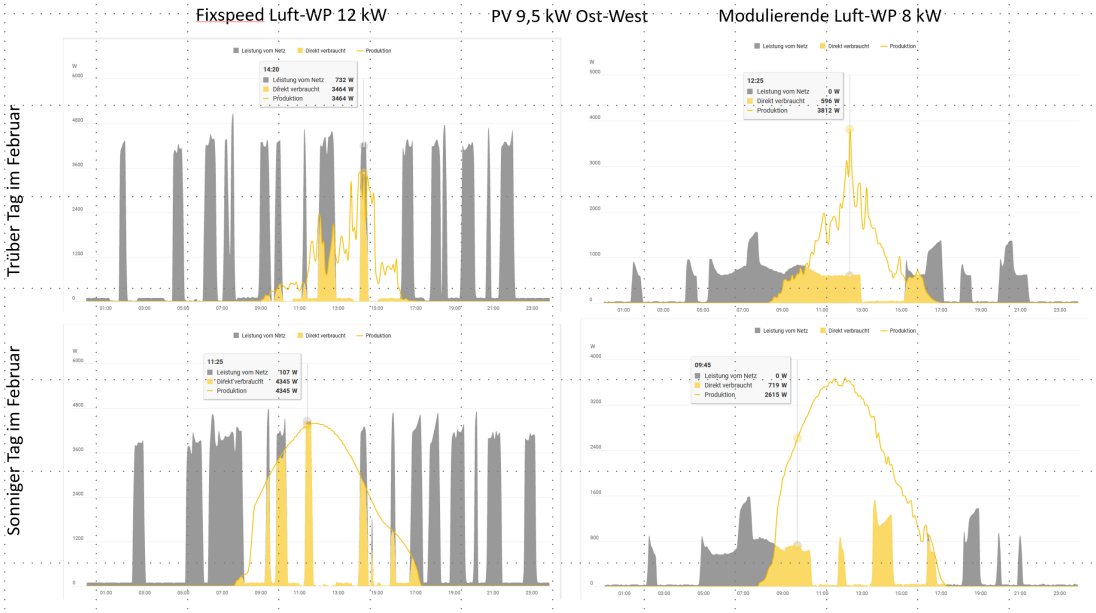


Abbildung 4: a) Monitoring Daten des PV-Ertrags (gelb) einer 9,5 kW PV-Anlage jeweils an einem trüben und sonnigen Februartag links (a) mit dem Verbrauch (grau) einer fix-speed Wärmepumpe und rechts (b) dem einer modulierenden Wärmepumpe für das gleiche Gebäude, Daten aus unterschiedlichen Jahren

3.3. Kältemittel

Auch das in der Wärmepumpe verwendete Kältemittel spielt eine wichtige Rolle. Bei verschiedenen Kältemitteln gibt es zwar auch schon durch thermodynamische Eigenschaften Effizienzunterschiede, allerdings spielen für die Anlageneffizienz noch weitere Faktoren eine Rolle (siehe z.B. Kap. 3.1), so dass diese anhand der fertigen Anlagen beurteilt werden sollte. Derzeit sind aber vor allem die Umweltaspekte von Kältemitteln das wichtigste Entscheidungskriterium bei der Wahl. Durch den sehr hohen Treibhauseffekt von H-FKW gibt es mit der Kältemittelverordnung in der EU seit 2015 einen Ausstiegsplan für viele Kältemittel mit einer stufenweise Reduktion. Dieser wurde zum 11.3.2024 nochmals verschärft. Von den drei derzeit mehrheitlich in Wärmepumpen verwendeten Kältemitteln R410a (GWP 2088), R32 (GWP 675) und R290 (Propan, GWP 3) darf ab 2027 in Neuanlagen nur noch Propan verwendet werden. Reparaturen an Bestandanlagen können weiterhin durchgeführt werden, aber durch die zu erwartenden Preissteigerungen der hoch-GWP Kältemittel gilt insbesondere für R410a das Risiko, dass diese deutlich kostspieliger werden können, wenn Kältemittel ersetzt werden muss.

Das letzte wichtige Kriterium, die Einschränkung der Aufstellmöglichkeiten einer Wärmepumpe aufgrund von Sicherheitsrisken betrifft vor allem Propan. Durch dessen Explosivität können derzeit nur Geräte mit einer Füllmenge von unter 150g beliebig in Innenräumen aufgestellt werden. Derzeit gibt es nach Wissen des Autors bisher nur eine einzige Erdreich-Wärmepumpe des Herstellers Ecoforest, die dieses Kriterium erfüllt. Der selbe Hersteller hat noch zwei größere Erdreich-WP für die Innenaufstellung. Diese überschreiten die maximale Füllmenge und benötigen dafür ein Belüftungssystem. Alle anderen Maschinen müssen außen aufgestellt werden. Hierbei muss das Heizungswasser zur Wärmepumpe nach draußen geführt werden. Dies birgt das geringe Risiko, dass bei einem langen Stromausfall im Hochwinter das Wasser im Gerät gefrieren könnte und dabei der Wärmetauscher zerstört wird. Die Anlage sollte daher so verbaut werden, dass die Außeneinheit im Notfall leicht entleert werden kann.

Da Außenaufstellung mit herkömmlichen Kältemitteln nur für Luftwärmepumpen interessant war, gibt es bisher auch nur eine außenaufgestellte Erdreich-Wärmepumpe mit Propan des Herstellers Heliotherm in zwei Größen. Im Bereich der Erdreich-Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln gibt es also noch dringend Nachholbedarf der Hersteller. Es wird derzeit aber auch über eine Lockerung der sehr strengen 150g-Regelung (dies ist weniger als in einer Campinggaskartusche enthalten ist) diskutiert.

3.4. Umweltwärmequelle

Die genutzte Umweltwärmequelle ist das offensichtlichste Unterscheidungsmerkmal von Wärmepumpen, soll hier aber bewusst auf die neueren Entwicklungen beschränkt werden. Das wichtigste Merkmal der Quelle für die Effizienz der Wärmepumpen ist die Temperatur. Der beste Indikator ist die energie-gewichtete mittlere Jahrestemperatur. Luft scheint am ungünstigsten, jedoch ist die Temperatur nicht so niedrig wie man intuitiv erwarten würde. Im Feldtest des Fraunhofer ISE [11] wurden Temperaturen zwischen 2,2°C und 7,1°C mit einem Mittelwert von 5,0°C gemessen. Die Erdreich-Wärmepumpen im gleichen Feldtest hatten Soletemperaturen zwischen 3,3°C und 9,4°C mit einem Mittelwert von 4,9°C, also sehr ähnliche Werte. Die in Feldtest bisher immer gemessenen deutlich schlechteren JAZ der Luft-WP mit etwa 3 gegenüber 4 bei Sole-WP müssen also andere Ursachen haben.

Luft hat wesentlich schlechtere Wärmeübertragungseigenschaften als Wasser und Sole. Daher müssen in Luft-WP wesentlich größere Wärmeübertragerflächen verbaut werden und wesentlich größere Volumenströme umgewälzt werden. Hier wurde in der Vergangenheit offensichtlich eher kostengünstig ausgelegt, wie die neueste Generation von LWP zeigt. Seit im Jahr 2020 ein neuer Hersteller, die Firma Lambda mit einer Propan-LWP auf den Markt kam, die den SCOP-Wert für Niedertemperaturanwendung (Fußbodenheizung) auf 5,7 und für Mitteltemperaturanwendung (Heizkörper, Warmwasser) auf 4,5 in den Bereich guter SWP gehoben hat, konnten schon zwei Hersteller (Ovum, Heliotherm) nachziehen. Es ist zu erwarten, dass noch weitere Hersteller in diesen Bereich folgen werden. Diese Zahlen müssen erst noch in Feldtests bestätigt werden, aber erste Zahlen aus der Praxis zeigen, dass damit die Luft-WP zu den SWP aufgeschlossen haben dürften.

Es stellt sich die Frage, ob sich die Mehrinvestition in eine Erdreichwärmepumpe dann noch lohnt. Rein wirtschaftlich betrachtet mit einer langfristigen Perspektive sicherlich ja, da üblicherweise die Lebensdauern von Erdwärmeanlagen mit mindestens 50 Jahren angesetzt werden und Luftwärmepumpen teurer sind als Solewärmepumpen. Mit der ersten Ersatzwärmepumpe nach etwa 15 – 20 Jahren zieht die Erdreichwärmepumpe in den kumulierten Investitionskosten etwa gleich, da die hocheffiziente Luft-WP teurer sind als eine entsprechende Sole-WP. Es gibt aber noch andere Argumente für Sole-WP. Sie haben keine Aufstellprobleme wegen Geräuschbelästigung und ausgeblasener Kaltluft. Gerade im Hinblick auf dichter bebaute Reihenhaussiedlungen kann dies wichtiger Faktor sein. Und im Hinblick auf die Stromnetze erzeugen sie an sehr kalten Wintertagen keine zusätzliche Lastspitze, wie dies Luft-WP tun.

Grundwasser-Wärmepumpen schneiden trotz theoretisch wärmster Wärmequelle in Feldtests im Durchschnitt schlechter ab als Erdreich-Wärmepumpen. Grund dafür sind fehlende, passgenaue hocheffiziente Brunnenpumpen im Einfamilienhausbereich. Hier liegen die Kosten für eine Grundwasser-WP in einem vergleichbaren Bereich zu Erdsondenanlagen. Allerdings ist die Grundwassernutzung mit höheren Risiken verbunden. Es gibt erste Grundwasser-WP die phasenweise nicht mehr betrieben werden können, weil durch den Klimawandel der Grundwasserspiegel gesunken ist. Bei einer Wahlmöglichkeit sollte im Ein- und Zweifamilienhausbereich einer Sondenanlage der Vorzug gegeben werden, es sei denn die Grundwasserbedingungen sind optimal. Bei größeren Objekten hingegen werden Grundwasser-WP aus Kostengründen attraktiver, da die Kosten für Brunnen und Sonden unterschiedlich mit der benötigten Leistung skalieren.

4. Fazit

In den letzten 20 Jahren hat sich durch die Einführung von modulierenden Wärmepumpen die Effizienz in der Praxis deutlich verbessert, so dass nun auch in Bestandsgebäuden die Wärmepumpe zur Sanierung in den meisten Fällen empfohlen werden kann. Dabei sollten die Heizungsauslegung überprüft und angepasst werden, sowie zusätzlich bei Bedarf einzelne Heizkörper ersetzt werden mit dem Ziel, die Vorlauftemperatur soweit wie möglich absenken zu können. Prinzipiell wäre die Reihenfolge erst Gebäudehülle dann Heizung sanieren zwar sinnvoller, ist aber nicht zwingend nötig. Denn auch der Ersatz eines Öl-Heizkessels durch eine effiziente Wärmepumpe reduziert den CO_2-Ausstoß der Heizung schon im ungünstigen Fall einer Heizkörperheizung um etwa 50%. Die Strategie des BMWK alte Heizkessel möglichst schnell durch Wärmepumpen ersetzen zu wollen, ist also aus Klimaschutzgründen dringend nötig und derzeit auch alternativlos.

5. Literatur

[1] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität

[2] Kopernikus-Projekt Ariadne (2021): Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich. https://doi.org/10.48485/pik.2021.006

[3] Öko-Institut, Fraunhofer ISE (2016): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes

[4] BDH Pressemitteilung 19.2.24: Heizungsindustrie: Rekordabsatz in turbulentem Marktumfeld, https://www.bdh-industrie.de/presse/pressemeldungen/artikel/heizungsindustrie-rekordabsatz-in-turbulentem-marktumfeld

[5] Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) 5.0 und 5.1

[6] Rosenow, 2024, A meta-review of 54 studies on hydrogen heating, Cell Reports Sustainability 1, 100010, January 26, 2024

[7] Destatis, 2022: Waldgesamtrechnung – Berichtszeitraum 2014 – 2020

[8] AG Energiebilanzen e.V., 2023, Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken

[9] Lämmle et al, Gezielter Heizkörper-Austausch in Wärmepumpen Heizungsanlagen, DKV-Tagung 2019

[10] Eichler Stephan, 2024, Betrachtung der Wärmepumpentauglichkeit von Bestandswohngebäuden anhand von Praxisbeispielen, Masterarbeit TH Rosenheim

[11] Günther et al., 2020, Abschlussbericht Wärmepumpen in Bestandsgebäuden – Wpsmart im Bestand, Fraunhofer ISE

Die neue Wärmepumpen-Generation: Propan oder R32? – Effizienz und Dimensionierung im Wohngebäudebestand

Michael Schaub
Hochschule Coburg,
Energieeffizientes Gebäudedesign
Coburg, Deutschland



Die neue Wärmepumpen-Generation: Propan oder R32? – Effizienz und Dimensionierung im Wohngebäudebestand

Die zunehmende Häufigkeit von Extremwetter-Ereignissen in Europa und die Bedrohungsszenarien bevorstehender Kipppunkte des globalen Klimas lassen eine drastische Reduktion der energiebedingten CO_2-Emissionen dringlicher erscheinen, denn je. Mit einem Anteil von ca. 20 bis 25 % an diesen Emissionen (DE) weisen die Gebäudebeheizung und die Trinkwarmwasser-Bereitung erhebliche Potenziale für Sofortmaßnahmen auf.
So ermöglicht der Ersatz von Wärmeerzeugern auf der Basis von fossilen Energieträgern durch Wärmepumpen bereits mit dem aktuellen deutschen Strom-Mix (2023) eine Reduktion der CO_2-Emissionen von etwa 40 bis 60 % im Vergleich zu einem modernen Gas-Brennwertkessel.
Eine neue Generation von Wärmepumpen mit dem natürlichen Kältemittel Propan erreicht Vorlauftemperaturen von 70 °C bei -10 °C Außenlufttemperatur und ist daher auch für un- oder teilsanierte Bestandsgebäude mit Heizkörpern als Wärmeübergabe geeignet.
Für sehr große Heizlasten (z.B. Mehrfamilienhäuser) ermöglichen derart hohe Vorlauftemperaturen ferner eine bivalent-parallele Hybridisierung mit Öl- oder Gasheizungen. Da der allergrößte Teil der Heizarbeit in Teillast erfolgt, sind dabei schon für geringe Leistungsanteile der Wärmepumpe (30 bis 50 %) Reduktionen des Brennstoffbedarfs von ca. 60 bis 80 % und der CO_2-Emissionen um rund 30 bis 40 % zu erwarten.

1. Emissions-Minderungspotenziale

Für Erdgas-Brennwertkessel mit einem Jahresnutzungsgrad von 95 % entstehen pro abgegebener kWh Nutzwärme ca. 212 g CO_2-Emissionen – und damit knapp 27 % weniger als im Falle von Heizöl-Brennwertkesseln. Die CO_2-Emissionen von Pellet- bzw. Stückholzkessel liegen mit 42 bzw. 36 g_{CO2} pro kWh Nutzwärme noch einmal gut 80 % unterhalb derer des Erdgas-Brennwertkessels. Gleichwohl würden die nachwachsenden Holzmengen selbst bei vollständiger thermischer Verwertung nur für einen Bruchteil der erforderlichen Heizwärme ausreichen. Nach einer stofflichen Nutzung sollten sie daher eher als «Joker» zur Wärmeerzeugung für Gebäude oder Prozesse betrachtet werden, die nicht oder nur eingeschränkt energetisch saniert bzw. anders dekarbonisiert werden können.

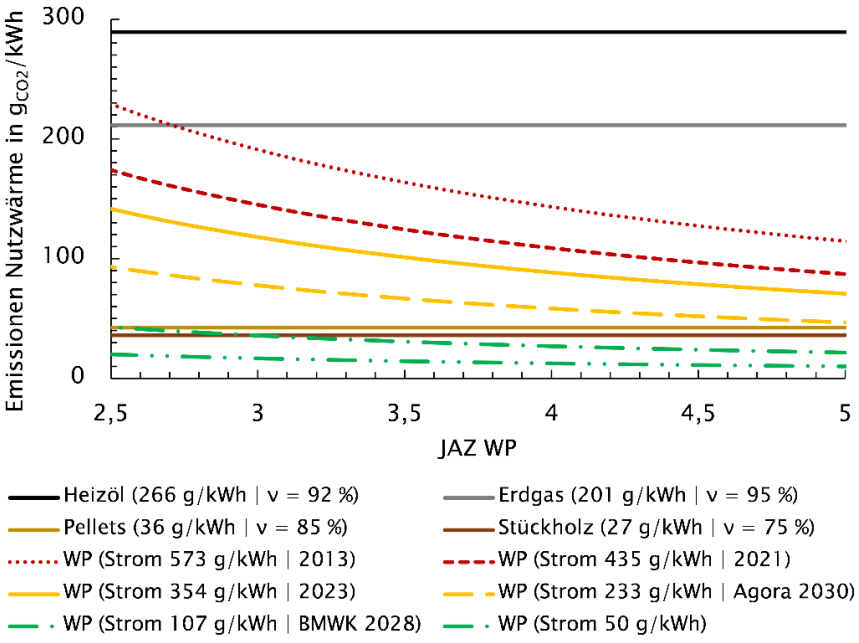


Abbildung 1: CO_2-Emissionen je kWh Nutzwärme nach Technologie und Effizienzgrad

Im Falle einer Nutzung der unbegrenzt verfügbaren Umgebungswärme durch eine Wärmepumpe hängen die spezifischen CO_2-Emissionen hingegen stark von der JAZ und dem verwendeten Strom-Mix ab, wie Abbildung 1 verdeutlicht. Mit einer typischen JAZ von 3 und einem CO_2-Footprint des Stroms von 354 g/kWh (Deutschland 2023) liegen die CO_2-Emissionen der Wärmepumpe pro kWh Nutzwärme bei ca. 118 g/kWh und damit rund 44 % unterhalb des Erdgas-Brennwertkessels. Bei einer JAZ von 4 wären es noch 89 g_{CO2} pro kWh Nutzwärme und somit rund 58 % weniger als im Falle des Erdgas-Brennwertkessels. Sobald die spezifischen Emissionen des Stroms auf rund 100 g/kWh zurück gehen, werden die nutzwärmebezogenen Emissionen von Wärmepumpen mit einer JAZ von 3 vergleichbar mit holzbasierten Heizsystemen.

2. Kältemittel

Neben den CO_2-Emissionen gehen von Heizsystemen weitere Umweltauswirkungen aus; im Falle von Feuerungssystemen z.B. Feinstaub- und Schadstoff-Emissionen. Für Wärmepumpen sind insb. das Ozon-Abbaupotential (ODP) und die direkte Treibhausgaswirkung (GWP) von Kältemittel-Leckagen sowie per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) aus den Abbauprozessen der Kältemittel innerhalb der Atmosphäre zu berücksichtigen. Während das ODP bereits durch Inverkehrbringungs-Verbote für FCKW und H-FCKW verhindert wird, werden Kältemitteln mit hohen GWP durch bevorstehende regulatorische Maßnahmen sukzessive reduziert. Dabei ist insb. die 2024 in Kraft getretene novellierte F-Gase-Verordnung zu nennen, wonach in Europa auch der Einsatz des Kältemittels R32 und vergleichbarer H-FKW in Neugeräten je nach Bauweise und Leistung sowie Kältemittel-Quelle (Frischware oder recycelt) schon bis zum Zeitraum 2027 bis 2033 eingestellt werden muss. Aufgrund der Anreicherung von PFAS u.a. im Grundwasser (sog. Ewigkeits-Chemikalien) muss innerhalb der EU darüber hinaus im Zeitraum von 2032 bis 2050 die Inverkehrbringung sämtlicher F-Gase (auch HFO mit geringem GWP wie R1234ze) eingestellt werden.
Mittel- und langfristig kommen daher praktisch ausschließlich natürliche Kältemittel ohne derart negative Umweltwirkungen für eine Verwendung in Wärmepumpen in Frage. Neben Ammoniak (R717) für Kälteanlagen und CO_2 (R744) für Hochtemperatur-Anwendungen wie z.B. Wärmenetze eigenen sich für Wärmepumpen im Wohngebäudebereich insb. Kohlenwasserstoffe wie Fluorethan (R161), Dimethylether (RE170), Propan (R290), Cyclopropan (RC270), Propen (R1270) oder Mischungen daraus (vgl. z.B. [Höges et al. 2022]).

2.1. Arbeitsbereiche

Während in der vergangenen Dekade insb. H-FKW mit hohem GWP (wie z.B. R410A) zur Anwendung in Wärmepumpen kamen, konnte der Betriebsbereich durch eine Umstellung auf R32 nicht nur der GWP um ca. 68 % reduziert, sondern auch der Arbeitsbereich für Heizanwendungen vergrößert werden, wie in Abbildung 2 ersichtlich.

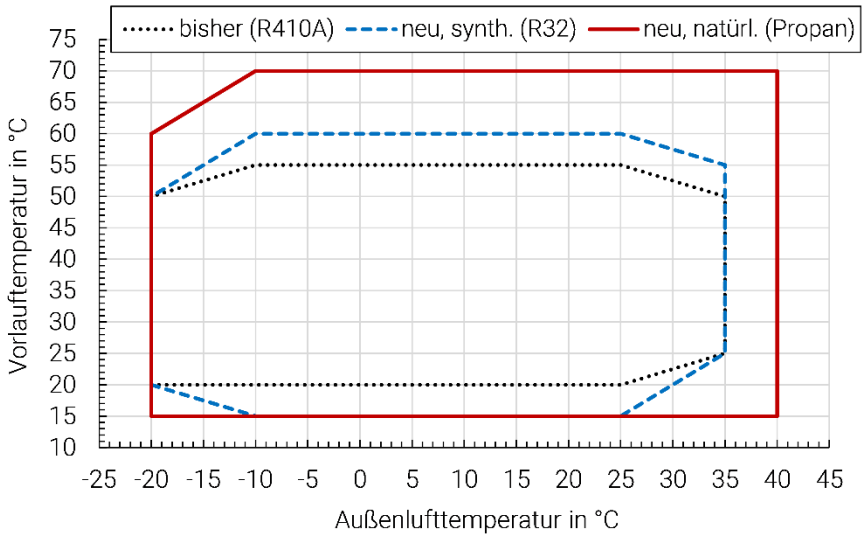


Abbildung 2: typische Arbeitsbereiche von Wärmepumpen für Wohngebäude je Kältemittel

So konnten Luft/Wasser-Wärmepumpen mit R410A bei -10 °C Außenlufttemperatur typischerweise Vorlauftemperaturen von max. 55 °C bereitstellen, wohingegen Maschinen mit R32 überwiegend 60 °C, teils bis 65 °C erreichen. Durch die Verwendung von Propan (R290) wird dieser Betriebsbereich nochmals auf 70 °C, vereinzelt sogar 75 °C erweitert, wie ebenfalls in Abbildung 2 ersichtlich.

2.2. Effizienz

Vorlauftemperaturen von 70 °C bei Außenlufttemperaturen von -10 °C ermöglichen die Verwendung von Propan-Wärmepumpen auch im Falle von Heizkörpern für sehr viele un- oder teilsanierte Bestandsgebäude (bis zu einer Heizkurven-Neigung von ca. 1,6 bis 1,8). Zwar ist die Effizienz in derartigen Betriebspunkten niedrig (COP < 2), diese haben jedoch nur einen geringen Anteil an der Jahresheizarbeit, wie aus Abbildung 3 hervorgeht.

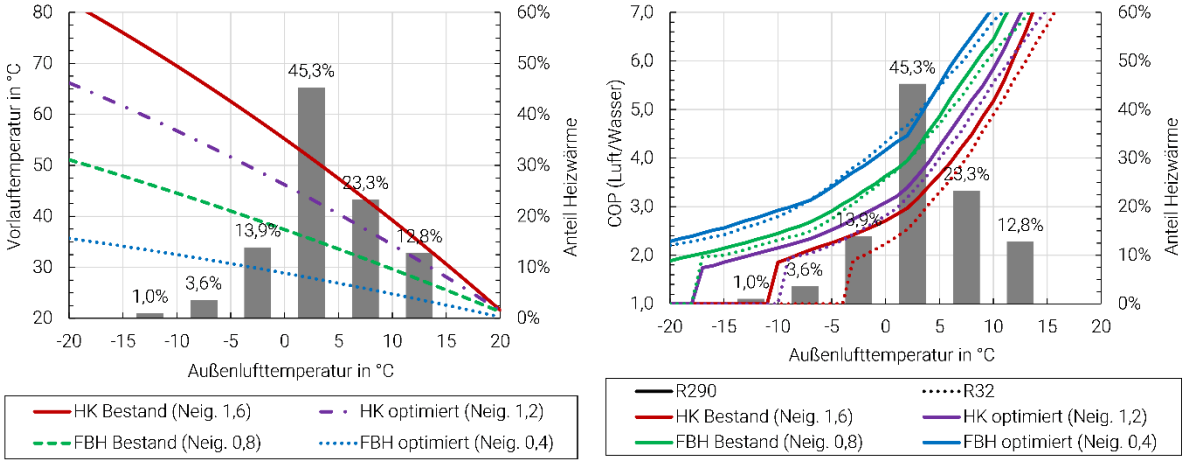


Abbildung 3: Verteilung Jahresheizarbeit und Vorlauftemperaturen (links) sowie beispielhafter COPs (rechts)

So entfallen z.B. in der deutschen Klimazone 13 (schwäbisch-fränkisches Stufenland und Alpenvorland) über 80 % der Jahresheizarbeit auf Außentemperaturen über 0 °C und im Falle von Heizkörpern auf notwendige Vorlauftemperaturen von unter 55 °C. In diesem Betriebspunkt (A0/W55) liegt der COP von marktverfügbaren Propan-Wärmepumpen bereits um 3. Die Effizienzwerte von aktuellen R32-Wärmepumpen unterscheiden sich dabei nur geringfügig. Der kleinere Arbeitsbereich (vgl. Abbildung 2) bewirkt jedoch eine frühere Zuschaltung des direkt-elektrischen Heizstabs.
Abbildung 4 zeigt eine Übersicht der SCOP gemäß EN 14825 der in Deutschland förderfähigen Luft/Wasser-Wärmepumpen («BAFA-Liste», Stand 10/2023) mit R32 bzw. Propan.

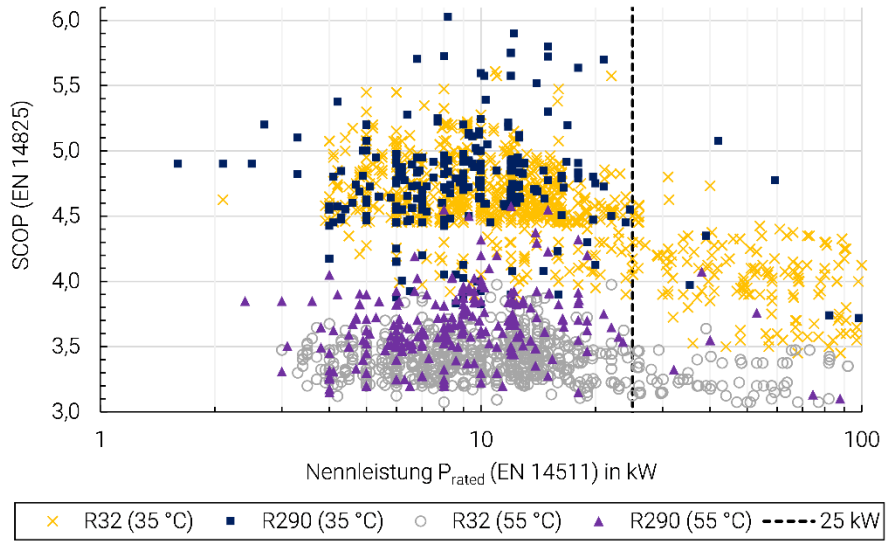


Abbildung 4: SCOP förderfähige Luft/Wasser-Wärmepumpen (Datenquelle: «BAFA-Liste» 10/2023)

Für Nennleistungen über ca. 25 kW zeigt sich insb. bei den R32-Maschinen eine Kohorten-Verlagerung hin zu geringeren SCOP, da es sich hierbei überwiegend um reversibel betriebene Kaltwassersätze handelt, die nicht für den Wärmepumpenbetrieb optimiert wurden. Eine Analyse der Nennleistungen bis 25 kW zeigt für Niedertemperatur-Anwendungen (35 °C) nahezu identische mittlere SCOP von 4,70 bei R32 und 4,72 im Falle von R290. Der Maximalwert liegt für R290 mit 6,03 jedoch deutlich höher als der höchste Effizienzwert unter den R32-Maschinen von 5,61. Für Mitteltemperatur-Anwendungen (55 °C) liegt der mittlere SCOP der Propan-Maschinen mit 3,62 bereits über den R32-Maschinen (3,42). Dies zeigt sich ebenso in den Maximalwerten von 4,58 (R290) bzw. 3,98 (R32).

2.3. Sicherheit

Aufgrund der höheren Brennbarkeit von Propan sind gemäß EN 378-3 Kältemittel-Ansammlungen und Zündquellen zu vermeiden und Sicherheitsabstände zu Gebäudeöffnungen einzuhalten. Letztere sind Füllmengen-abhängig und somit individuell, belaufen sich jedoch für die Leistungsklasse von Einfamilienhäusern typischerweise auf eine Größenordnung von 1 m und für Mehrfamilienhäuser auf ca. 2 bis 5 m.

3. Wärmepumpen

Im Bereich der Luft/Wasser-Wärmepumpen sind R32-Maschinen wohl aufgrund der umfangreichen Erfahrungen asiatischer Hersteller mit Luft/Luft-Split- und Multisplit-Geräten vorwiegend in Split-Bauweise marktverfügbar. Aufgrund der Füllmengenbegrenzung in Innenräumen wurden Propan-Wärmepumpen hingegen nahezu ausschließlich in Monoblock-Bauweise konstruiert.
Eine Marktrecherche zu Sole/Wasser-Wärmepumpen deutet darauf hin, dass die Entwicklungstätigkeiten in diesem Segment zuletzt weniger stark vorangeschritten sind. So sind aktuell nur sehr wenige Sole/Wasser-Wärmepumpen mit Propan (außen aufgestellt in Monoblock-Bauweise) bekannt. Die deutliche Mehrheit der marktverfügbaren Geräte weist hier sogar noch ältere H-FKW wie R410A auf.

3.1. Bauweise & Systemgestaltung

Im Falle der Luft/Wasser-Wärmepumpen sind die Außen- und Inneneinheit bei Split-Bauweise durch Kältemittel-Leitungen verbunden. In der Außeneinheit befinden sich typischerweise Verdampfer, Verdichter und Expansionsventil und in der Inneneinheit Verflüssiger und Hydraulik-Komponenten. Im Gegensatz dazu beherbergt die Außeneinheit bei Monoblock-Bauweise den vollständigen Kältekreis. Der Wärmetransport von der Außen- zur Inneneinheit erfolgt dabei mithilfe eines Wasserkreislaufs, in den für den Fall einer Havarie des Verflüssigers z.B. ein Gasabscheider oder ähnliche Sicherheitseinrichtungen integriert sind, um einen Transport von brennbarem Propan in das Gebäude zu vermeiden.
Meist beinhaltet die Inneneinheit aktueller Geräte neben einer entsprechenden Umwälzpumpe auch den direkt-elektrischen Heizstab sowie ein Ventil zur Umschaltung zwischen Heizmodus (Vorlauftemperatur gemäß Heizkurve) und Trinkwarmwasser-Bereitung. Herstellerabhängig sind in der Inneneinheit ggf. auch das Membran-Ausdehnungsgefäß und/oder ein kleiner Pufferspeicher zur Bereitstellung der Abtauwärme bei Prozessumkehr integriert. Die Heizkreise können somit häufig unmittelbar an der Inneneinheit angeschlossen werden. Zwischengeschaltete Puffer- und/oder Kombispeicher lassen jedoch aufgrund der geringeren Takt-Häufigkeit eine längere Lebensdauer der Wärmepumpe (Druckstöße und unvollständige Schmierung bei jedem Verdichter-Start) sowie bei wirksamer Temperaturschichtung auch eine höhere Systemeffizienz erwarten, da insb. bei der Trinkwarmwasser-Bereitung große Potenziale zur Reduktion von Mischungsverlusten bestehen (vgl. z.B. [Haller et al. 2015])

3.2. Dimensionierung

Die Dimensionierung von Wärmepumpen erfolgt derzeit zumeist grafisch anhand eines Leistungsdiagramms, wie es Abbildung 5 beispielhaft für eine marktübliche leistungsmodulierende Luft/Wasser-Wärmepumpe mit R290 zeigt.

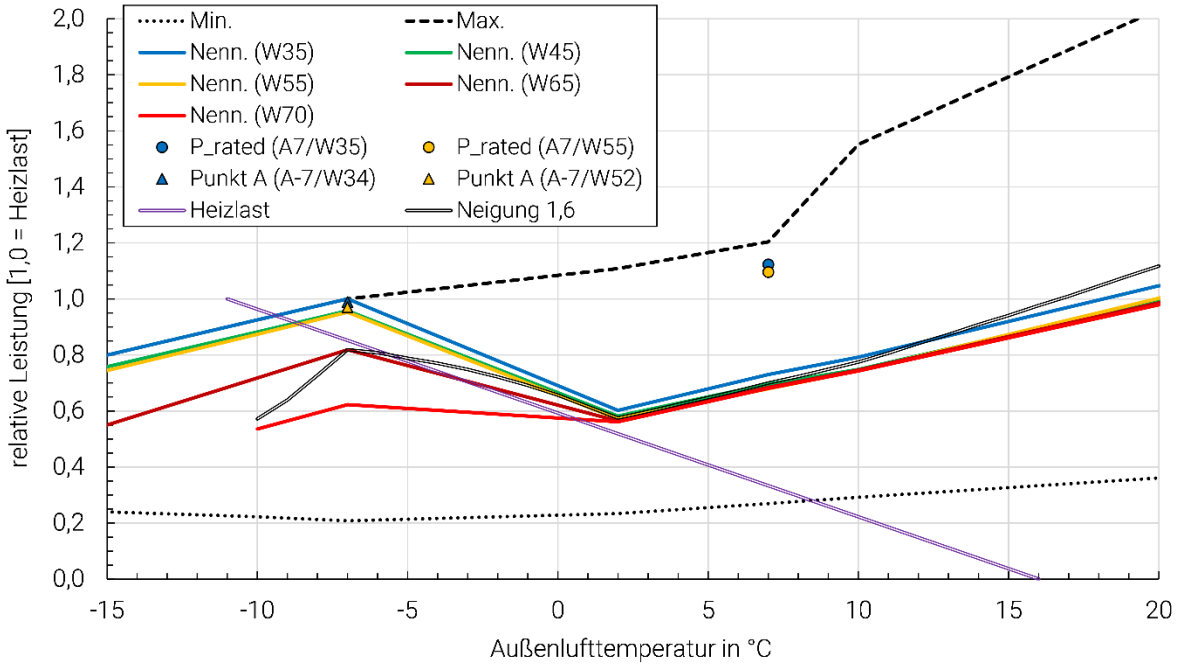


Abbildung 5: Auslegungsdiagramm leistungsmodulierende Luft/Wasser-Wärmepumpe mit R290 (Datenquelle: Produktbeispiel Viessmann Vitocal 250-A, idealisiert skaliert)

Dargestellt sind die minimalen und maximalen Heizleistungen (schwarze Linien) sowie die Nenn-Heizleistungen der Wärmepumpe in unterschiedlichen Betriebspunkten (bunte Linien). Der Unterschied zwischen beiden Angaben liegt in der Berücksichtigung der Abtauung. So kann die maximale Heizleistung nur kurzfristig bereitgestellt werden; nämlich so lange, bis eine Abtauung erforderlich ist. Die Nenn-Heizleistung entspricht hingegen dem zeitlichen Mittel der verfügbaren Leistung inkl. Unterbrechungen durch Abtauzyklen. Dabei liegt das Minimum der Nennleistung (und somit der größte Unterschied zur Maximalleistung) im Betriebspunktpunkt A2. In diesem Temperaturbereich der Außenluft ist die Abtauung am häufigsten erforderlich. Bei höheren Außenlufttemperaturen reduziert sich die Reifbildung wegen steigender Verdampfer-Oberflächentemperaturen. Bei niedrigeren Außenlufttemperaturen geht die Abtau-Häufigkeit ebenfalls zurück, da sich weniger absolute Feuchte in der Außenluft befindet.
Die baugrößenmäßige Leistungsangabe von Wärmepumpen erfolgt zumeist anhand der gemäß EN 14511-2 mittels «Norm-Nennbedingungen» definierten Größe P_{rated}, die sich auf eine Außenlufttemperatur von 7 °C bezieht und sowohl für niedrige (35 °C) als auch für mittlere (55 °C) Vorlauftemperaturen auf dem Ökodesign-Label angegeben wird.
Etwas geringere Leistungen (hier ca. 12 %) resultieren für die Angabe des Teillastpunkts A der EN 14825. Dieser wird bei einer Außenlufttemperatur von -7 °C definiert und bezieht sich für leistungsmodulierende Luft/Wasser-Wärmepumpen bei mittlerem Klima (Referenzort Straßburg) für Niedertemperatur-Anwendungen auf 34 °C Vorlauftemperatur bzw. für Mitteltemperatur-Anwendungen auf 52 °C. Der Teillastpunkt A wird auch für die Ermittlung des Leistungsanteils der Wärmepumpe im Falle eines Hybridsystems gemäß § 71h des deutschen Gebäudeenergiegesetzes (GEG) herangezogen und ist für alle Hersteller deklarationspflichtig gemäß der EU-Verordnungen 811/2013 bzw. 813/2013.

Für die eigentliche Dimensionierung wird zunächst eine näherungsweise Lastkennlinie des Gebäudes eingezeichnet. Diese ist definiert durch die Heizlast bei der Auslegungs-Außentemperatur (hier -11 °C für Coburg, DE) und durch eine Last von Null bei der Heizgrenztemperatur (hier «BIN-Grenztemperatur» 16 °C gemäß EN 14825).
Neben den zahlreichen o.g. Möglichkeiten zur Leistungsangabe der Wärmepumpe variiert auch die Definition des Begriffs «Heizlast» stark. Die deutsche VDI 4645 («Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern – Planung, Errichtung, Betrieb») bezieht sich zunächst auf die EN 12831-1 mit nationaler Ergänzung DIN/TS 12831-1 und erhöht diese dann u.a. um Zuschläge für die Trinkwarmwasser-Bereitung und für mögliche Sperrzeiten des Energieversorgers. Ferner sieht die VDI 4645 eine zweistufige Vorgehensweise vor; zunächst eine Grundlagenermittlung mit Empfehlung zu einer vereinfachten

Ermittlung der Heizlast durch ein Hüllflächenverfahren und im Anschluss eine Detailplanung mit ausführlicher Heizlastberechnung. Diese Vorgehensweise erfordert jedoch die Berücksichtigung von drei verschiedenen Planungsrichtlinien mit einem Gesamtumfang von derzeit 467 Seiten und erscheint daher für den Anwendungsfall der Ein- und Mehrfamilienhäuser unverhältnismäßig. Darüber hinaus variiert die Berücksichtigung von Gewinnen in der Heizlastrechnung gemäß EN 12381-1 trotz europäischer Harmonisierung je nach nationaler Ergänzung (für Deutschland setzt DIN/TS 12831-1 solare und interne Gewinne zu Null). Validierungsbeispiele deuten jedoch darauf hin, dass die berechneten Heizlasten gemäß EN 12831-1 insb. in Bestandsgebäuden regelmäßig deutlich zu hoch sind (vgl. z.B. [Dankert 2020]). Methodisch einfachere Ansätze bestehen für Neubauten und vollständige energetische Sanierungen z.B. in flächenspezifischen Lastkennwerten in Abhängigkeit der Gebäudegeometrie und für Bestandsgebäude z.B. in der Bestimmung eines Wärmeverlustkoeffizienten aus einzelnen Leistungswerten des vorhandenen Wärmeerzeugers bei verschiedenen Außentemperaturen (sofern bekannt) oder in einer Umrechnung der Jahreswerte des Endenergieverbrauchs auf der Basis von Vollbenutzungsstunden in Abhängigkeit der Gradtagszahl und mittels typischer Jahresnutzungsgrade des Wärmeerzeugers.

Unabhängig von der Bestimmung der Heizlast scheidet eine monovalente Dimensionierung im Falle von Luft/Wasser-Wärmepumpen zumeist aus, da die Bandbreite der erforderlichen Leistung zwischen Maximallast und Heizgrenze das Modulationsvermögen deutlich überschreitet. In den Planungsunterlagen der Hersteller sind daher häufig Vorgehensweisen für eine monoenergetisch bivalent-parallele Dimensionierung (Wärmepumpe + Elektro-Heizstab) beschrieben. Dabei erfolgt entweder die Bestimmung einer max. Bivalenz-Temperatur (Schnittpunkt zwischen der Last-Kennlinie des Gebäudes und der Leistungs-Kennlinie der Wärmepumpe) oder eines Mindest-Leistungsanteils des Wärmepumpenprozesses bei der Auslegungs-Außentemperatur. In beiden Vorgehensweisen wird ein Heizwärmeanteil des Heizstabs von unter 5 %, besser unter 3 % angestrebt. Die zurückgezogene DIN V 4701-10 gab für bivalent-parallele Wärmeerzeuger Orientierungswerte von -2 °C bzw. -5 °C für den Bivalenz-Punkt und min. 46 % bzw. 58 % für den Leistungsanteil des Grundlasterzeugers (Wärmepumpenprozess) an, um die o.g. Heizwärmeanteile zu erreichen.
Wie aus Abbildung 5 ebenfalls ersichtlich wird, unterscheiden sich die Leistungs-Kennlinien leistungsmodulierender Wärmepumpen jedoch insb. bei sehr tiefen Außenlufttemperaturen auch deutlich in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur. Daher gestaltet sich die Auswahl einer Vorlauftemperatur als kaum praktikabel, denn tatsächlich benötigt das Gebäude für jede Außenlufttemperatur eine andere Vorlauftemperatur (Heizkurve). Prinzipiell wären in den Auslegungs-Diagrammen daher Nenn-Heizleistungen für verschiedene Heizkurven-Neigungen anstatt für konstante Vorlauftemperaturen erforderlich, wie in Abbildung 5 am Beispiel einer Heizkurve mit der Neigung 1,6 (entspricht ca. 70 °C Vorlauftemperatur bei -10 °C Außenlufttemperatur) durch lineare Interpolation zwischen den herstellerseitig angegebenen Betriebspunkten ergänzt.

Für das Dimensionierungs-Beispiel in Abbildung 5 wurde die Heizlast bei Auslegungs-Außentemperatur (-11 °C) mit dem Wert 1,0 definiert, entspricht hier also dem größten tatsächlich auftretenden Lastwert. Darüber hinaus wurden die Leistungswerte der Wärmepumpe so skaliert, dass die Nennleistung im **Betriebspunkt A-7/W35** ebenfalls dem Wert 1,0 entspricht. Für diesen Betriebspunkt sind im hier betrachteten Beispiel sowohl die Variation zwischen Nennleistung und maximaler Leistung als auch die Abweichung zu den Leistungsangaben des Teillastpunkts A gemäß EN 14825 (niedrige und mittlere Temperatur) kleiner als 3 %. Der dabei resultierende Bivalenzpunkt der Lastkennlinie und der Leistungskurve für die Heizkurven-Neigung 1,6 liegt bei ca. -5,6 °C. Der Leistungsanteil des Heizstabs bei Auslegungs-Außentemperatur (-11 °C) kann grafisch nicht mehr bestimmt werden, da der Arbeitsbereich des Wärmepumpenprozesses für diese Heizkurven-Neigung bereits bei ca. -10 °C endet. Bei -10 °C hat der Wärmepumpenprozess jedoch einen Leistungsanteil von knapp 59 %. Beide Parameter liegen somit sehr nah an den o.g. Orientierungswerten der zurückgezogenen DIN V 4701-10 für einen maximalen Heizwärmeanteil des Heizstabs von ca. 3 %.

In Abbildung 6 ist links die Auswirkung einer Variation des Anteils der Wärmepumpen-Nennleistung im Betriebspunkt A-7/W35 an der Heizlast auf die JAZ_{Heizen} für verschiedene Heizkurven-Neigungen dargestellt.

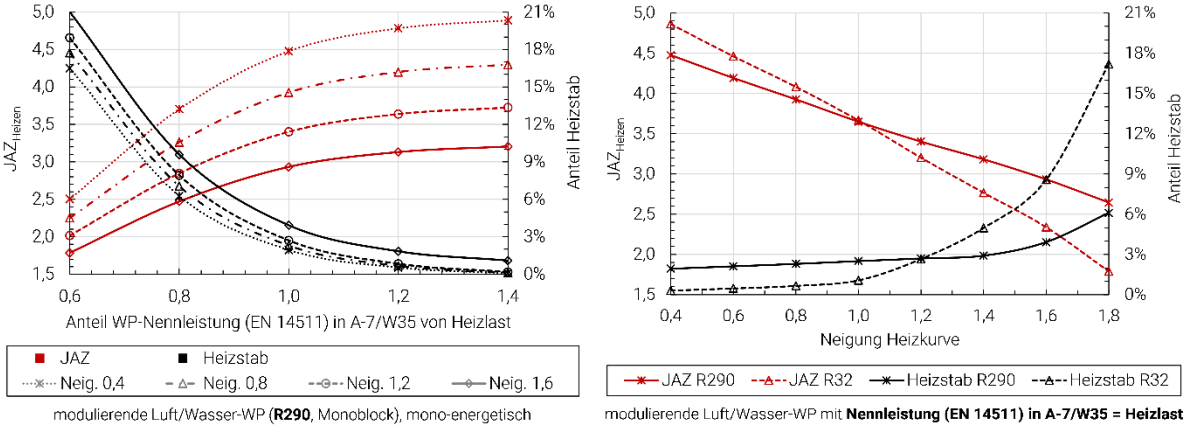


Abbildung 6: Einfluss Leistungsanteil Wärmepumpe (links) bzw. Heizkurven-Neigung (rechts) auf JAZ_{Heizen}

Die Betrachtung beruht auf dem realen Lastkennfeld (Herstellerangaben) des Produktbeispiels einer leistungsmodulierenden Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Propan gemäß Abbildung 5 und dem stündlichen Lastprofil für Heizwärme (ohne Trinkwarmwasser-Bereitung) in Wohngebäuden gemäß der deutschen VDI 4655. Dabei zeigt sich für Leistungsanteile von unter 1,0 eine starke Zunahme des Heizstab-Anteils an der Heizwärme und eine deutliche Abnahme der JAZ_{Heizen}. Für höhere Leistungsanteile stellen sich nur noch geringfügige Änderungen am Anteil des Heizstabs und an der JAZ_{Heizen} ein. Für eine vereinfachte, praxisgerechte Auswahl von leistungsmodulierenden Luft/Wasser-Wärmepumpen erscheint daher eine Angleichung der Nennleistung im Arbeitspunkt A-7/W35 an die maximal auftretende Heizlast sinnvoll.
Im rechten Teil der Abbildung 6 ist für eine solche Dimensionierung (Nennleistung in A-7/W35 = maximal auftretende Heizlast) darüber hinaus der Einfluss der Heizkurven-Neigung auf den Heizstab-Anteil und die JAZ_{Heizen} für dieselbe Propan-Maschine sowie für eine R32-Maschine dargestellt. Anhand der berechneten JAZ_{Heizen} wird erkennbar, dass die Propan-Maschine für Heizkurven-Neigungen > 1,0 einen Effizienzvorteil gegenüber der R32-Maschine aufweist. Auch lässt sich ableiten, dass die Heizkurven-Neigung in diesem Beispiel einen Wert von ca. 1,4 im Falle von R32 bzw. ca. 1,7 im Falle von R290 nicht überschreiten sollte, um den Heizstab-Anteil auf max. 5 % zu begrenzen.
Eine Überprüfung des Einflusses variierender Lastprofile bzw. Maximalleistungen (z.B. durch eine zusätzliche Berücksichtigung der Trinkwarmwasser-Bereitung und/oder durch Sperrzeiten des Energieversorgers) auf diese Vorgehensweise ist im Rahmen der hier dargestellten Betrachtung nicht erfolgt.

4. Hybrid-Systeme

Die vorangegangene Variation der Dimensionierungsparameter von leistungsmodulierenden Luft/Wasser-Wärmepumpen bezog sich auf eine bivalent-parallele Betriebsweise mit einem direkt-elektrischen Heizstab als Spitzenlast-Wärmeerzeuger. Aufgrund des erweiterten Betriebsbereichs von Propan-Wärmepumpen mit Vorlauftemperaturen von bis zu 70 °C kommt stattdessen (insb. für sehr große Heizlasten) auch ein bivalent-paralleler Betrieb mit einem Gas-Brennwertkessel infrage. Dies wird auch von der 2024 in Kraft getretenen Novelle des deutschen GEG als pauschale Erfüllungsoption für einen erneuerbaren Wärmeanteil von min. 65 % zugelassen, sofern der Leistungsanteil der Wärmepumpe im Teillastpunkt A gemäß EN 14825 (vgl. Kapitel 3) bei bivalent-paralleler oder -teilparalleler Betriebsweise und regelungstechnischem Vorrang für die Wärmepumpe mindestens 30 % der installierten Leistung eines Brennwert-Kessels oder der rechnerischen Heizlast (ohne Definition, an anderer Stelle jedoch EN 12831-1) beträgt.

Der hohe Heizwärmeanteil von Grundlasterzeugern mit geringem Leistungsanteil bei bivalent-paralleler Betriebsweise begründet sich in der großen Teillast-Häufigkeit des Wärmebedarfs von Wohngebäuden, wie in Abbildung 7 (links) erkennbar. Für das dargestellte Lastprofil (nur Heizen) gemäß VDI 4655 resultieren mit der beispielhaften Leistungs-Charakteristik einer Propan-Wärmepumpe gemäß Abbildung 5 schon mit einem Leistungsanteil der Wärmepumpe von 30 bis 50 % (bezogen auf A-7/W35) eine rechnerische Reduktion des Erdgas-Bedarfs von ca. 60 bis 80 % und für einen Strom-Mix mit spezifischen Emissionen von 366 g_{CO2}/kWh eine Emissions-Minderung von etwa 30 bis 40 % im Vergleich zum monovalenten Gas-Brennwertkessel (Abbildung 7, rechts). Dabei zeigt das Baualter des Gebäudes bzw. die Heizkurven-Neigung nur einen geringen Einfluss.

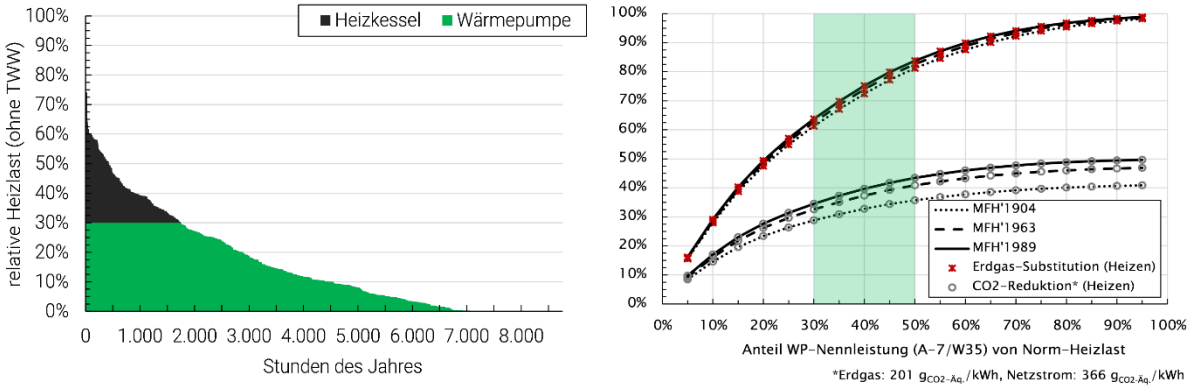


Abbildung 7: Lastprofil Wohngebäude und Heizwärmeanteil Wärmepumpe bei 30 % Leistungsanteil (links) und Erdgas-Substitution sowie Emissions-Minderung in Abhängigkeit des Leistungsanteils (rechts)

Ein solches bivalent-paralleles Heizsystem aus Propan-Wärmepumpe und Brennwertkessel stellt somit eine Sofortmaßnahme zur wirksamen Emissions-Minderung in un- oder teilsanierten Mehrfamilienhäusern dar. Da die Mehrfamilienhäuser in Deutschland mit einem Anteil von nur rund 17 % der Gebäude über 50 % der Wohnungen und ca. 38 % der CO_2-Emissionen durch Heizen und Trinkwarmwasser im Wohngebäudesektor repräsentieren, sind für derartige Hybridsysteme vor dem Hintergrund von begrenzten Kapazitäten im Handwerk pro installierter Wärmepumpe größere absolute CO_2-Einsparungen zu erwarten als bei einer mono-energetischen Verwendung in Einfamilienhäusern. Dies erscheint insb. auch deshalb sinnvoll, weil die energetische Sanierung des deutschen Wohngebäudebestands mit der derzeitigen Sanierungsquote (je nach Datengrundlage) rechnerisch noch immer ca. 50 bis 70 Jahre in Anspruch nehmen würde. Folglich werden sehr viele Wohngebäude bereits vor der energetischen Sanierung eine neue GEG- (bzw. EPBD-) konforme Heizung benötigen.
Nach der Gebäudesanierung reduziert sich die Heizlast dann typischerweise in einem Maße, welches fortan eine alleinige Beheizung des Gebäudes durch die Wärmepumpe (ergänzt um einen Heizstab) zulässt. Ferner verschafft ein Hybridsystem aus Wärmepumpe und Brennwertkessel als Übergangssystem mehr Zeit für den Ausbau des Stromnetzes, da im Falle der «kalten Dunkelflaute» anstelle einer Zuschaltung des Heizstabs auf (bestehende) Erdgas- bzw. Heizöl-Infrastruktur zurückgegriffen wird. Für den Gebäudebetreiber ist der Wartungsaufwand eines hybriden Systems jedoch zunächst größer.

5. Zusammenfassung

- Die spezifischen CO_2-Emissionen von Wärmepumpen sind schon mit dem heutigen deutschen Strom-Mix ca. 40 bis 60 % geringer als bei Gas-Brennwertkessen.
- Die Inverkehrbringung von R32-Wärmepumpen muss in Europa bis zum Zeitraum 2027 bis 2033 (je nach Bauweise und Leistung) beendet werden.
- Propan-Wärmepumpen ermöglichen 70 °C Vorlauftemperatur bei -10 °C Außenlufttemperatur und sind somit für Bestandsgebäude mit Heizkörpern geeignet.
- Über 80 % der Heizarbeit finden bei Außenlufttemperaturen von über 0 °C und auch im Falle von Heizkörpern bei Vorlauftemperaturen von unter 55 °C statt. Dies lässt auch in unsanierten Gebäuden vertretbare JAZ um 3 erwarten.

- Propan-Wärmepumpen sind nur in Monoblock-Bauweise marktverfügbar und werden mit Sicherheitsabständen von ca. 1 bis 5 m zu Gebäudeöffnungen aufgestellt.
- Für eine vereinfachte, praxisgerechte Dimensionierung von leistungsmodulierenden Luft/Wasser-Wärmepumpen erscheint eine Angleichung der Nennleistung im Betriebspunkt A-7/W35 an die maximal auftretende Heizlast sinnvoll.
- Bei großen Heizlasten (z.B. unsanierte Mehrfamilienhäuser) ermöglicht der bivalent-parallele Betrieb von Propan-Wärmepumpen und Brennwertkesseln eine Emissions-Minderung von 30 bis 40 % als GEG-konforme Sofort-Maßnahme.

6. Literatur

[Dankert 2020] Dankert, Uwe: Heizlast nach DIN EN 12831. Teil 1: Die Lücke zwischen Regelwerk und Realität. Teil 2: Den Verbrauch analysieren. Online-Quellen (15.03.2024):
https://www.haustec.de/heizung/waermeerzeugung/heizlast-nach-din-en-12831-die-luecke-zwischen-regelwerk-und-realitaet
https://www.haustec.de/heizung/waermeerzeugung/heizlast-nach-din-en-12831-den-verbrauch-analysieren

[Haller et al. 2015] Haller, Michel Y. et al.: StorEx – Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Schichtungseffizienz von Wärmespeichern. Schlussbericht. Hochschule für Technik Rapperswil: Institut für Solartechnik SPF, 2015.

[Höges et al. 2022] Höges, Christoph et al.: Bewertung alternativer Arbeitsmittel für Wärmepumpen im Gebäudesektor. In: Forschung Ingenieurwesen (2022) 86, 213–224. DOI: 10.1007/s10010-022-00584-0

Solide Planung als Grundlage effizienter Wärmepumpensysteme

Fabian Ochs
Universität Innsbruck
Innsbruck, Austria



Georgios Dermentzis
Mara Magni
William Monteleone
Elisa Venturi

Solide Planung als Grundlage effizienter Wärmepumpensysteme

1. Einleitung

Die Europäische Union strebt eine Reduzierung des CO_2-Ausstoßes um mindestens 55 % bis 2030 an, um das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Um diese ehrgeizigen Ziele zu erreichen, muss zum einen die Sanierungsrate deutlich erhöht werden (auf etwa 3 % im Vergleich zu den derzeitigen etwa 1 %) und zum anderen müssen Strategien entwickelt und Anreize geschaffen werden, um die Effizienz zu steigern und den Energiebedarf drastisch zu senken. Der Gebäudesektor ist für 35 % des weltweiten Endenergieverbrauchs verantwortlich, der überwiegende Teil durch den Wohnsektor [1]. Aufgrund der insgesamt begrenzten Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom und Fernwärme und der steigenden Nachfrage nach Strom für Verkehr und Industrie ist die thermische Sanierung von Gebäuden für die Erreichung der Klimaziele unabdingbar. Wärmepumpen werden eine entscheidende Rolle bei einer nachhaltigen und effizienten Wärmeversorgung von Gebäuden spielen werden [2].
Eine der größeren Herausforderungen bei der Transformation des Gebäudebestands sind die Mehrfamilienhäuser, insbesondere in innerstädtischen hochverdichteten Gebieten. Ein bedeutender Anteil der Mehrfamilienhäuser wird wohnungsweise dezentral mit Gasetagenheizungen – häufig Durchlauferhitzer, teilweise Speichersysteme – beheizt [3]. Bei der Sanierung solcher Mehrfamilienhäuser ist eine vollständige Modernisierung des Heizungssystems und Umstellung auf ein zentrales System eine Herausforderung. Eine Umstellung von fossilen Heizsystemen auf Wärmepumpen ist (häufig) technisch nur in Kombination mit einer entsprechenden thermischen Sanierung möglich [4].
Um eine deutlich höhere Sanierungsrate und den Ausstieg aus fossilen Heizsystemen zu erreichen, sind neue minimalinvasive und adaptive Sanierungsverfahren erforderlich, die Bau- und Gebäudesysteme mit der Energieumwandlung auf Basis erneuerbarer Energiequellen verbinden. Dafür ist eine integrale Planung notwendig, die schon bei der Projektenwicklung angreift und die Vorplanung unterstützt. Dabei muss unterschieden werden in die Planung und Umsetzung eines spezifischen Gebäudes und in die Bewertung eines Clusters von Gebäuden (Portfolioanalyse).
In [5] wurden mehr als 250.000 Kombinationen von Gebäudetypen und -alter, Effizienzniveaus der Gebäudehülle und Anlagensystemkonfigurationen für verschiedene Standorte in Europa analysiert, auch unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Machbarkeit. Verschiedene Sanierungspakete wurden hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Machbarkeit und Umweltauswirkungen in [6] analysiert und in [7] wurde eine umfassende Simulationsstudie für eine neue Wohnsiedlung durchgeführt, um eine Entscheidungsfindung hinsichtlich der Wahl des Heizsystems, des Zentralisierungsgrads des Heizsystems, des Wärmeverteilungssystems und der Qualität der Rohrleitungsdämmung zu unterstützen.
Herausfordernd bleibt, dass im aktuellen Planungsprozess mit den getrennten Disziplinen Architektur, Bauphysik, Gebäudetechnik die integrale Planung im Sinne einer ganzheitlichen Optimierung kaum umzusetzen ist, und dies sowohl bei der klassischen seriellen Planung als auch bei der sog. Integralen, d.h. BIM basierten, Planung. Ein integrale Planungsprozess, der Bauphysik und Gebäudetechnik iterativ koppelt und dabei ausreichenden Detaillierungsgrad bezüglich der Wärmepumpensystemplanung erlaubt, ist derzeit nicht Stand der Technik und wird, wenn, nur in Forschungsprojekten realisiert [8]. Das Passivhausprojektierungspaket (PHPP) ermöglicht zwar im Unterschied zum Energieausweis, der das Ziel hat die energetische Qualität von Gebäuden sichtbar und vergleichbar zu machen, bereits seit vielen Jahren die ganzheitliche Bewertung, aber dafür sind (externe) Planungsleistungen Voraussetzung. Beispielsweise wird die Rohrleitungsplanung bzw. -berechnung, die Speicherauslegung und die Dimensionierung der Wärmepumpe(n) und Zirkulationspumpen typischerweise von einem Gebäudetechnikbüro geliefert und wird i.d.R. nur für einen Fall (d.h. für eine Heizlast, ein Wärmeabgabe- und für ein WP-System) ausgeführt. Eine Variantenstudie bzw. eine ganzheitliche Optimierung, die sowohl die Gebäudehülle als auch die Anlagentechnik und Erneuerbare Energie mit einbezieht ist damit zwar prinzipiell möglich, aber zu aufwändig. Entsprechend erfolgt die Systemwahl

häufig regel- bzw. erfahrungsbasiert und nicht auf Basis einer Berechnung bzw. Simulation mit dem Ziel einer kostenoptimalen Lösung mit minimalen Emissionen (bzw. maximalem Systemwirkungsgrad).
Um in einer frühen, aber wichtigen Entscheidungsphase eine zielgerichtete ganzheitliche Planung anbieten zu können, müssen die mit der Planung und Optimierung beauftragten Fachplanenden (Architektur, Energieberatung, Bauphysik, TGA) auf Planungstools (Tabellenkalkulationen, Simulation) und Datenbanken zurückgreifen können.

2. Integrale Planung

2.1. Motivation

WP-Systeme müssen sorgfältig geplant und umgesetzt werden, um einen robusten und effizienten Betrieb zu gewährleisten. Dies gilt umso mehr bei der Sanierung bestehender Gebäude und v.a. im Mehrgeschosswohnbau. Das Energieeinsparpotenzial und die Kosten, wenn nicht sogar die Umsetzbarkeit überhaupt, von (seriellen) Sanierungen mit unterschiedlichen Wärmepumpenlösungen und der Integration von Erneuerbarer Energie hängt stark von guter und umfassender Planung ab. Je nach Art, Größe und Qualität des Gebäudes und abhängig von den Randbedingungen und Einschränkungen (Quellenverfügbarkeit, Platzangebot) sind zentrale (d.h. ein System pro Gebäude), dezentrale (d.h. wohnungsweise) oder gemischte (zentrale/dezentrale) Heizsysteme von Vorteil.

Die ganzheitliche Planung umfasst neben der Qualität der thermischen Hülle auch das Wärmeverteilungs- und Wärmeabgabekonzept, die WP-Quellenerschließung sowie die PV-Integration vor Ort inklusive Energiespeicherung. Aus Effizienzgründen ist auf möglichst niedrige Vor- und Rücklauftemperaturen sowie aus Akzeptanzgründen auf gut dimensionierte WP für minimalen Platzbedarf und minimale Geräuschemissionen innen und außen zu achten. Sowohl die Größe als auch die Schallemission der WP stehen in direktem Zusammenhang mit der thermischen Leistung der Wärmepumpe und damit mit der Heizlast des Gebäudes. Somit führt die Verbesserung der thermischen Hülle des Gebäudes nicht nur zu einem geringeren Energiebedarf, sondern auch zu einer geringeren WP-Kapazität bei geringerer Größe, geringerem Platzbedarf und geringeren Schallemissionen.

2.2. Workflow (Designprozess)

Es wurde ein Workflow (Designprozess) entwickelt, mit dem die thermische Sanierung und die Effizienz verschiedener WP-Lösungen (zentral, semi-zentral, dezentral/gemischt siehe Abb. 1) bewertet, optimiert und verglichen werden können. Dazu gehören die Verteilungs- und Speicherverluste sowie die Leistungszahl der WP als Funktion der notwendigen Vorlauftemperatur und in Abhängigkeit von den Wärmeabgabesystemen und der Heizlast des Gebäudes. Für die Bewertung und den Vergleich unterschiedlicher thermischer Sanierungsvarianten und WP-Lösungen für MFHs wurde ein tabellenbasiertes Planungstool entwickelt. Die Machbarkeit des Workflows wurde anhand von Fallstudien anhand einer Tabellenkalkulation als Erweiterung bestehender Tabellenkalkulationstools (wie z.B. dem PHPP) getestet, um die gezielte ganzheitliche Planung und Optimierung von thermischen Sanierungen und die Umstellung auf WP-basierte Heizsysteme zu unterstützen.

2.3. Digitaler Zwilling

Im Kontext von Gebäuden ist ein digitaler Zwilling eine virtuelle Darstellung eines physischen Gebäudes inkl. dessen Struktur und dessen Gebäudesystem. Typischerweise wird für die Erstellung eines Digitalen Zwillings auf vorhandenen Modellen wie z.B. Building Information Modeling (BIM) aufgebaut und zusätzlich (Echtzeit-)Daten von Sensoren eingebunden und in Rahmen der Datenanalyse verknüpft. Anwendung des Digitalen Zwillings finden in verschiedenen Phasen bzw. für verschiedene Anwendungen statt.
- Planung und Bau
- Monitoring und Wartung
- Energie-Effizienz
- Lebenszyklus-Management
- Komfort für Bewohner:innen
- Vorbereitung für Notfälle

Insgesamt tragen digitale Zwillinge für Gebäude zu einer besseren Entscheidungsfindung, höherer Effizienz und verbesserter Nachhaltigkeit während des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes bei. Sie versetzen die Beteiligten in die Lage, Gebäude auf datengesteuerte und proaktive Weise zu verwalten und zu optimieren. Die Vorteile können wie folgt zusammengefasst werden:

- Optimiertes Design
- Kosteneinsparungen
- Verbesserte Bauplanung
- Energie-Effizienz
- Effizienter Betrieb und Wartung
- Verbesserte Raumluftqualität und thermischer Komfort
- Datengestützte Entscheidungsfindung

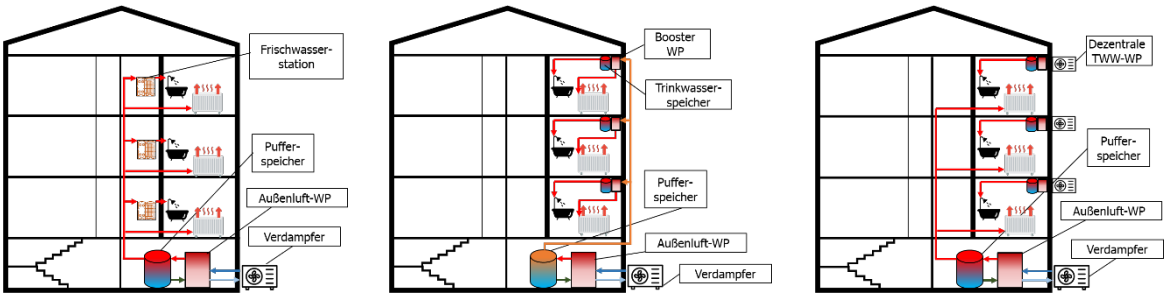
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein digitaler Zwilling eines Gebäudes einen ganzheitlichen, datengesteuerten Ansatz für Planung, Bau, Betrieb und Wartung bietet. Er trägt zu Kosteneinsparungen und Effizienzverbesserungen bei und unterstützt damit die gezielte ganzheitliche Planung und Optimierung von thermischen Sanierungen und die Umstellung auf WP-basierte Heizsysteme.

2.4. Wärmepumpensysteme

Auf Basis von [8] wird in folgende WP-Systeme unterschieden, Beispielhaft sind in Abb. 1 drei verschiedene Systeme schematisch dargestellt:

Tabelle 1: Verschiedene WP-Systeme mit einigen typischen Eigenschaften; z: zentral, d: dezentral; m: monovalent, b: bivalent; WÜ: Wärmeübertrager; VT: Vorlauftemperatur (zentral), RH: Raumheizung, TWW: Trinkwarmwasser; FWS: Frischwasserstation, WÜS: Wärmeübergabestation; D-E: Durchlauferhitzer, RL: Rücklauf;

Kategorie	Systemvariante	Speicher	WÜ	Betrieb	VT(RH)/[°C]	VT(TWW)/[°C]
Zentral	4 L-Z (Zirkulation)	z	z(ext, int)	m/(b)	45	65
	2+2 L FWS	z	d	m/(b)	45	55
	3 L FWS	z	d	m/(b)	45	55
	2 L WÜS	z	d	m/(b)	55	55
	2 L "Beladefenster"	z + d	-	m/(b)	45	60
Semi-Zentral	2 L RL-WP	z + d	-	m/(b)	45	-
	2 L Booster WP	z + d	-	m/(b)	25	-
Gemischt	2 L E-Boiler/(D-E)	(z +) d/-	-	b	45	-
	2 L HTS + D-EW	z	d	b	55	55
	2 L d-TWW-WP	(z +) d	-	m/(b)	45	-
	2 L-Z E-Heizung	z	z(ext, int)	b	-	65
	2 L FWS E-Heizung	z	d	b	-	55
Dezentral	d-WP (RH + TWW)	d	-	m/(b)	-	-
	d-WP (RH) + E-Boiler/(D-E)	d/-	-	b	-	-
	E-Heizung + d TWW-HP	d	-	b	-	-
	E-Heizung + E-Boiler/(D-E)	d	-	-	-	-



Zentral: 2+2 Leiter FWS | Semi-Zentral: 2 L mit Booster-WP | Gemischt 2L mit dez. TWW-WP

Abbildung 1: Beispiele verschiedene WP-Systeme

2.5. Integrale Planung

Der Workflow (Designprozess) ist schematisch in Abb. 2 dargestellt. Grundlegend soll der Workflow anhängig vom Planungsstand (Konzept/Grobplanung, Vorplanung, Detailplanung, Kostenkalkulation, Optimierung) und damit Informationsgrad erlauben zwischen einer Bilanzierung auf Jahres- bzw. Monatsbilanzebene, (quasistatisch) auf Stundenebene und einer dynamischen Simulation zu wechseln.

Für ein spezifisches Gebäude (Art, Größe, Anzahl Etagen und Wohnungen, etc.) mit den gegebenen Randbedingungen, können durch geeignete Wahl der Design-Variablen je nach Ziel (Performance-Indikatoren) und unter Berücksichtigung der Einschränkungen optimale Lösungen bestimmt werden:

Tabelle 2: Randbedingungen, Design-Variablen, Einschränkungen und Performance-Indikatoren bei der integralen Planung einer Sanierung mit Heizungstausch

Rand-bedingungen	- Standort - Klima - Umgebung - Quellenverfügbarkeit - Verfügbarkeit Fernwärme - Raumkühlung/Klimatisierung
Design-Variablen (Freiheitsgrade)	- Gebäudehülle (U-Wert Wand, Dach, Boden; U-Wert/g-Wert Fenster; Luftdichtheit; Wärmerückgewinnung, etc.) - Wärmeabgabe (Bestandsheizkörper, neue Heizkörper, Konvektoren, Flächenheizung) - Wärmeverteilsystem (s.o.) - Wärmequelle (je nach Verfügbarkeit, siehe RB) - Erneuerbare Energie (PV, thermische und elektrische Speicher)
Ein-schränkungen	- Platzbedarf - Schallemissionen - Investitionskosten - Elektrische Leistung (Hausanschluss, Wohnungsanschluss)
Performance-Indikatoren (KPIs)	- Gesamtwärmebedarf (Nutzenergie + Verluste) - Gesamtstrombedarf (Wärmepumpe für Heizung und Warmwasser, Hilfsenergie) - Netzstrombedarf (Gesamtbedarf abzüglich PV-Eigenverbrauch) - Arbeitszahl der Wärmepumpe - Systemarbeitszahl - Gesamtkosten (Lebenszykluskosten, Barwert) - CO_2-Emissionen

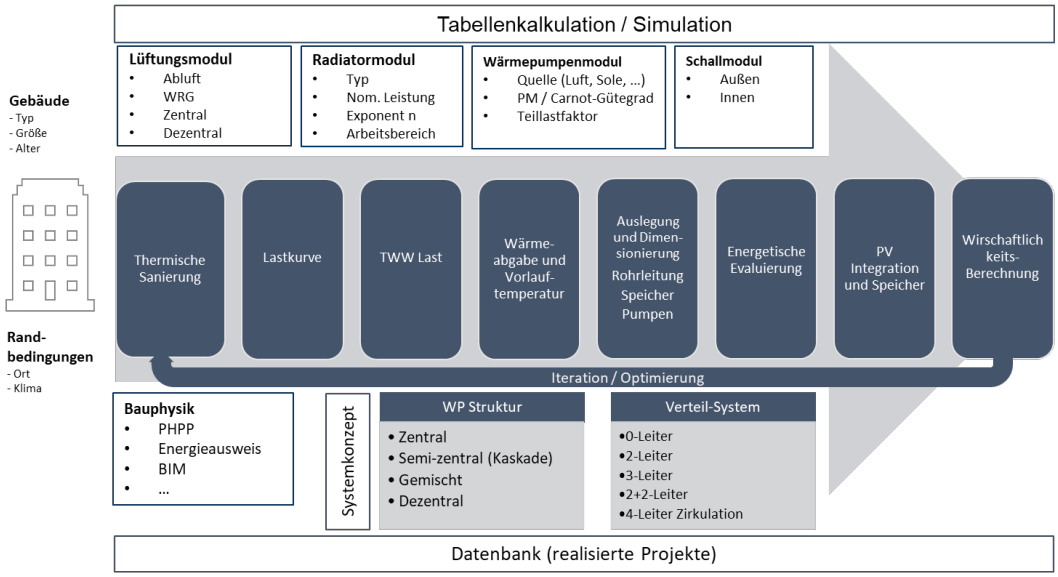


Abbildung 2: Workflow (Designprozess)

3. Fallstudie

Für ein mehrstöckiges Beispielgebäude werden verschiedene Lösungen durch Simulationen bewertet und optimiert. Dafür wird der Stromverbrauch zur Bereitstellung der Raumheizung, der Warmwasserbereitung und der Nebenverbraucher (Hilfsenergie) berücksichtigt. Bei der Fallstudie handelt es sich um einen Neubau aus dem Jahre 2015 für das verschiedene Sanierungsvarianten, d.h. Gebäudequalitäten und Wärmepumpenlösungen untersucht werden, vgl. Abb. 3. Für das Gebäude liegen umfassende Monitoring [9] und Simulationsergebnisse [10] vor.





Eigenschaft	**Wert**
Energiebezugsfläche EBF / [m²]	1296
Überbaute Fläche AFP / [m²]	449
Etagen / [-]	4
Anzahl Wohnungen / [-]	16
Wohnungsgröße AF / [m²]	73/98/98/109
Personen pro Whg. (Mittelw.) / [-]	3

Abbildung 3: Ansicht und Grundriss des Beispielgebäudes, sowie Eigenschaften des Gebäudes (NHT, Innsbruck).

Tabelle 3 stellt die untersuchten Varianten gegenüber.

Tabelle 3: Varianten – Energiestandards

	HWB 25	HWB 45	HWB 60
HWB / [kWh/(m² a)]	25	45	60
Gebäudestandard	EnerPHit, WRG	Komponenten in PH Qualität, Abluft	Mindeststandard, Abluft
TWW / [kWh/(m² a)]		19.8	

Abb. 4 zeigt den Strombedarf einer Auswahl der untersuchten Systeme für den Fall HWB 25, aufgeteilt in Anteile für Raumheizung, Warmwasser und Hilfsenergie. Der Anteil für die Raumheizung variiert zwischen den verschiedenen Systemen nur unwesentlich, aufgrund der hohen Effizienz der Wärmepumpe durch die niedrige Vorlauftemperatur (FBH). Allerdings variiert der Bedarf an Warmwasser zwischen den Systemen erheblich. Beispielsweise beträgt der Verbrauch bei der dezentralen TWW-WP 9,6 kWh/(m² a) und bei 4 L-Z 14,4 kWh/(m² a). Den höchsten Strombedarf weist die Variante mit E-Boiler auf (25,7 kWh/(m² a)). Durch den Einbau einer Duschabwasser-Wärmerückgewinnung (DWRG) in Kombination mit einem Elektroboiler wird der Verbrauch zwar deutlich um 4,5 kWh/(m² a) gesenkt, dies reicht jedoch nicht aus, um alle Wärmepumpensysteme schneiden besser ab. Dabei ist zu beachten, dass in allen Varianten die geforderte thermische Behaglichkeit erreicht wird.

Die Gründe für die deutlich unterschiedliche Gesamteffizienz sind einerseits die Wärmeverluste und andererseits die Arbeitszahl der Wärmepumpe. Beiden hängen von der Systemtemperatur ab (vgl. Tab. 1).

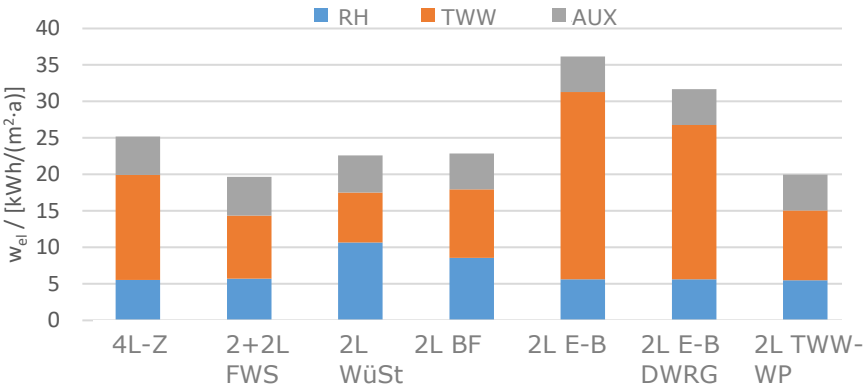


Abbildung 4: Spezifischer Strombedarf (w_{el}) für Raumheizung (RH), Warmwasser (TWW) und Hilfsenergie (Aux) für die verschiedenen Varianten für das Beispielgebäude mit einem HWB von 25 kWh/(m² a). Anmerkung: Verteilungsverluste im 2-Leitersystem Wärmeübergabestation (WüSt) sowie Beladefenster (BF) sind der Raumheizung zugeordnet.

In Abb. 5 ist die Übersicht der Energieflüsse für das zentrale-System 2+2L-FWS in einem Sankey-Diagramm dargestellt. Die Verteilverluste betragen 7,8 kWh/(a), wovon 2,6 kWh/(m² a) als nutzbare interne Gewinne in der Heizperiode anfallen. Darüber hinaus reduziert die mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung den Heizwärmebedarf um ca. 15 kWh/(m² a) (nach PHPP), dabei fallen etwa 3 kWh/(m² a) Hilfsenergie an. Bei einem solchen Sanierungsniveau liegen der Bedarf an Warmwasser und Raumwärme in einem ähnlichen Bereich und zusammen in der Größenordnung des Haushaltsstrombedarfs. Die Hilfsenergie hat einen relevanten Beitrag und muss bei der Planung berücksichtigt werden.

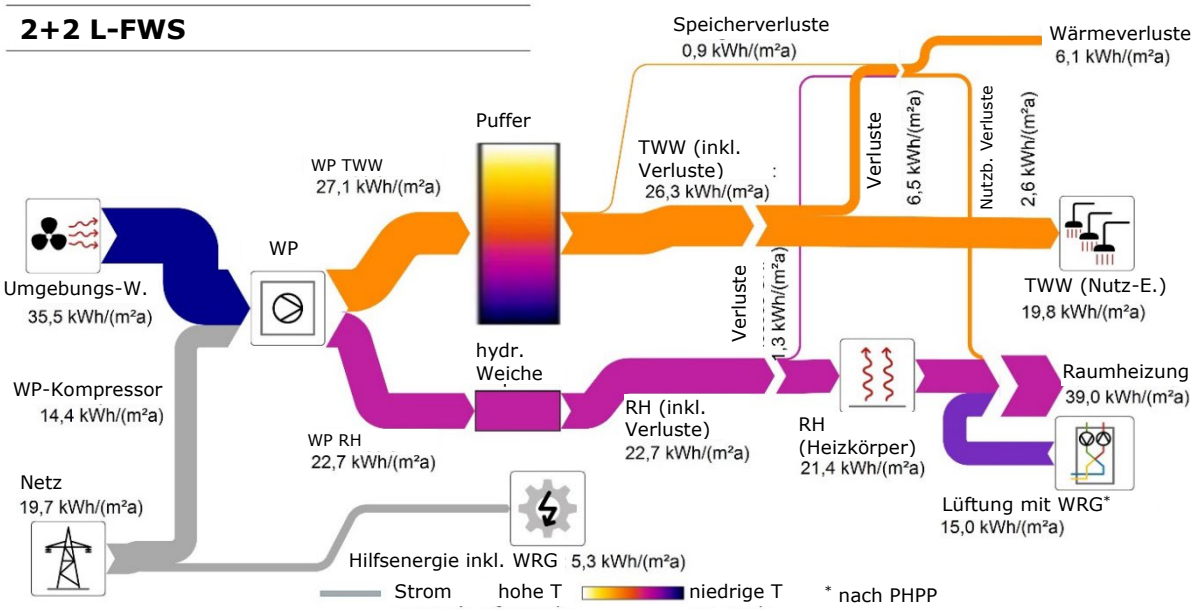


Abbildung 5: Sankey Diagramm des 2+2 Leitersystems mit Frischwasserstation (2+2L-FWS) für den Fall HWB = 25 kWh/(m2 a) (eSankey, Design EIV)

Im Vergleich des Strombedarfs aller simulierten Wärmepumpensysteme in den drei Sanierungsstufen (HWB 25, HWB 45 und HWB 60) zeigt sich, dass das zentrale System 2+2 L FWS jeweils am besten Abschneidet, jedoch wird die Differenz geringer. Allerdings hat dies darüber hinaus den Vorteil, dass es im Vergleich zu den Zweileitersystemen auch für die sommerliche Kühlung verwendet werden kann (entsprechendes Wärmeabgabesystem vorausgesetzt).

Die endgültige Wahl der Sanierungstiefe und des WP-Systems hängt natürlich stark von den spezifischen Randbedingungen und Einschränkungen (v.a. Platzmangel und Schallemissionen) ab sowie von den Kosten für die Umsetzung dieser Maßnahmen. Wenn ein zentrales WP-System eine Option sein kann, ist dies in der Regel kostengünstiger und weniger wartungsintensiv als der Einsatz dezentraler Wärmepumpen. Allerdings sind zentrale Systeme häufig schwer zu realisieren.

4. Schlussfolgerung und Ausblick

Die Entwicklung und Bewertung innovativer Lösungen für eine hocheffiziente Sanierung von MFH und für die Umstellung von fossilen auf WP-basierten Heizsystemen ist komplex und erfordert Expertenwissen sowohl aus bauphysikalischen als auch aus haustechnischen Planungsbüros sowie detaillierte Informationen zu technischen und nicht-technischen Randbedingungen und Einschränkungen. Mit dem entwickelten Workflow (Designprozess) wird eine integrale Planung mit einer Gegenüberstellung verschiedener Varianten bezüglich der Gebäudehülle und der Anlagentechnik (d.h. Wärmepumpensystem) bereits in einer frühen Planungsphase möglich. Der Workflow erlaubt in weiterer Folge die Auswahl und Optimierung eines Systems. Zukünftig soll daraus ein Digitaler Zwilling entstehen, der auch den optimalen Betrieb des Gebäudes unterstützen kann.

5. Danksagung

Die Ergebnisse sind Teil der Forschungsprojekte lowcost nZEB (Interreg), RenewNow (FFG), PhaseOut (FFG) und hp_reno_calc (renowave.at, FFG) sowie IEA HPT Annex 61 (FFG). Die Autoren danken für die Unterstützung.

6. Referenzen

[1] United Nations Environment Programme (2020), Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector. Nairobi, 2020.

[2] F. Ochs, M. Magni, G. Dermentzis, Integration of heat pumps in buildings and district heating systems – Evaluation on a building and energy system level, Energies 15 (11), 3889.

[3] Constanze Bongs et al., LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden («LowEx-Bestand Analyse»), Förderkennzeichen: 03SBE0001 A-C, 09.03.2023.

[4] F. Ochs, W. Monteleone, G. Dermentzis, D. Siegele, C. Speer, Compact Decentral Façade-Integrated Air-to-Air Heat Pumps for Serial Renovation of Multi-Apartment Buildings, Energies. 15 (2022).

[5] C. Dipasquale, R. Fedrizzi, A. Bellini, M. Gustafsson, F. Ochs, C. Bales, Database of energy, environmental and economic indicators of renovation packages for European residential buildings, Energy and Buildings. 203 (2019) 109427.

[6] M. Gustafsson, C. Dipasquale, S. Poppi, A. Bellini, R. Fedrizzi, C. Bales, F. Ochs, M. Sié, S. Holmberg, Economic and environmental analysis of energy renovation packages for European office buildings, Energy and Buildings. 148 (2017) 155 – 165.

[7] G. Dermentzis, F. Ochs, A. Thuer, W. Streicher, Supporting decision-making for heating and distribution systems in a new residential district – An Austrian case study, Energy. 224 (2021) 120141.

[8] G. Dermentzis, M. Magni, F. Ochs, W. Monteleone, B. Schaffer, Heat Pump Solutions in Renovations of Multi-Storey Buildings, Rehva Conference Clima 2022, Rotterdam.

[9] F. Ochs, W. Monteleone, G. Dermentzis, Optimal planning of deep thermal renovation and heat pump application in buildings, International Passive House Conference 2024, Innsbruck.

[10] G. Dermentzis, F. Ochs, N. Franzoi, Four years monitoring of heat pump, solar thermal and PV system in two net-zero energy multi-family buildings, Journal of Building Engineering 43, 103199.

[11] F. Ochs, N. Franzoi, G. Dermentzis, W. Monteleone, M. Magni, Monitoring and simulation-based optimization of two multi-apartment NZEBs with heat pump, solar thermal and PV, Journal of Building Performance Simulation 17 (1), 1 – 26.

GEBÄUDE – technik | bauteile | materialien

Holzbau und Technische Gebäudeausrüstung (TGA)

Installationskonzepte für die TGA- Modularisierung im mehrgeschossigen Holzbau

Petra Fortmüller
Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau
Arbeitsbereich Gebäudetechnik
Technische Universität Graz
Graz, Österreich



Prof. Michael Monsberger
Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau
Arbeitsbereich Gebäudetechnik
Technische Universität Graz
Graz, Österreich



Installationskonzepte für die TGA- Modularisierung im mehrgeschossigen Holzbau

1. Einleitung und Problemfelder

Holzbau und vor allem auch der Holzmassivbau sind stark im Zunehmen begriffen. Allerdings stellen Feuchteschäden für Holzbauten ein großes Problem sowohl in baulicher Hinsicht als auch aus Imagegründen dar. Im Forschungsprojekt «CLT_Plumbing_Design – Computergestützter Planungsprozess zur automatisierten Gestaltung von Nassräumen für den Holz-Massivbau» hat man sich der Feuchteschadensproblematik in Badezimmern angenommen und Lösungen geschaffen, die nicht nur die Sicherheit der Holzkonstruktion deutlich erhöhen, sondern auch die Komplexität im Planungs- und Bauprozess stark reduzieren sowie die TGA- Modularisierung in Badezimmern forcieren.

Die folgenden Unterkapitel geben einen kurzen Einblick in drei – in diesem Kontext relevante – Problemfelder. Anschließend werden im Projekt erarbeitete Installationskonzepte für die TGA- Modularisierung in Badezimmern anhand von BIM Modellen gezeigt und erläutert. Abschließend gibt es noch einen kurzen Ausblick auf einen neuen automatisierten Planungsprozess für holzbauadäquate Badezimmer der im Zuge des Projektes «CLT_Plumbing_Design» ebenfalls entwickelt wurde.

1.1. Problemfeld 1: Feuchteschäden im Holzbau

Feuchteschäden, die über einen längeren Zeitraum unbemerkt bleiben, haben das Potential die Holzkonstruktion massiv zu schädigen und stellen daher ein großes Problem für die Holzkonstruktion dar [1]. Solche Schäden sind schwer zu sanieren und verursachen hohe Kosten. Schäden resultieren einerseits aus Brauchwasser, das über undichte bzw. nicht vorhandene Abdichtungen oder durch Wasserverschleppung bis zur Holzkonstruktion vordringt. Andererseits gibt es aber auch viele Schäden durch undichte Rohre oder undichte Installationskomponenten [2]. Alleine in Deutschland gibt es jährlich über eine Million Leitungswasserschäden, die den Versicherungen gemeldet werden [3]. Laut Schadenstatistik des IFS für Leitungswasserschäden sind ca. 40% der untersuchten Leitungswasserschäden auf Installations- oder Montagefehler zurückzuführen [4].

Leider gibt es kaum Bewusstsein dafür, dass Holzbauten andere Installationsweisen erfordern als mineralische Massivbauten. Holzbauadäquate Installationen sollen kompakt geführt und zugänglich sein, über möglichst wenig Rohrverbindungsstellen und kurze Leitungslängen verfügen sowie weitgehend vorgefertigt sein [2]. Dies trägt maßgeblich dazu bei, dass Leitungswasserschäden inkl. deren Folgeschäden reduziert werden können. Falls dennoch Schäden auftreten, gilt es diese rasch zu detektieren bzw. sollte so geplant und gebaut werden, dass eine Schadensausbreitung möglichst reduziert wird [3]. In diesem Zusammenhang spielt auch die Abdichtung auf der Rohdecke wie sie in Österreich in Badezimmern in Holzbauten gemäß ÖNORM B3692-2014 [5] Stand der Technik ist eine wichtige Rolle.

Aktuell wird im Holzbau meist so installiert wie im Massivbau [6]. Vor allem eine oft ungeplante und unkoordinierte Leitungsführung in der Fußbodenkonstruktion steht gerade im Wohnbau an der Tagesordnung. Leitungen werden einfach auf Basis von «Vor-Ort-Entscheidungen» im Fußbodenaufbau «versenkt» [1]. Dies schafft unter anderem Probleme in der Gefälleausbildung von Abwasserleitungen und in der schalltechnisch korrekten Einbettung von Leitungen in der Schüttung. Im Falle einer Abdichtung auf der Rohdecke, die gerade im Holzbau essenziell für den Feuchtschutz der Holzkonstruktion ist, gesellen sich noch mannigfaltige Problemstellen im Kontext gebäudetechnischer Installationen in der Fußbodenkonstruktion hinzu. Nicht dicht ausgeführte Rohrdurchdringungen oder Beschädigungen durch die TGA-Montagearbeiten auf der Abdichtung («Baustellenverkehr» bzw. Durchschrauben der Abdichtung zur Rohrleitungsbefestigung) stellen hier die Problemstellenklassiker dar [7]. Zudem sind Leitungen in der Fußbodenkonstruktion

nicht sichtbar und nicht zugänglich, was im Schadensfall eine rasche Erkennung, sowie genaue Lokalisierung von schleichenden Leckagen kaum möglich macht [1].

Eine Leitungsführung in der Fußbodenkonstruktion ist zudem schlecht für die Modularisierung von TGA- Installationen. Sowohl aus Gründen der Zugänglichkeit als auch der deutlich verbesserten Möglichkeiten zur Vorfertigung und damit auch zur Qualitätssteigerung (z.B. Rohrverbindungen…) ist es sinnvoll TGA- Installationen komplett in Vorsatzschalen, Installationswänden oder Schächten zu verlegen. Diese Bereiche können über Revisionstüren leicht zugänglich gemacht werden und die Vorfertigung von Installationsregistern wird einfach möglich.

1.2. Problemfeld 2: Komplexität in Planung und Ausführung

Gerade die Leitungsführung in der Fußbodenkonstruktion zeigt, dass kaum ganzheitliches (Planungs- und Bauphasen übergreifendes) Verständnis bei vielen Baubeteiligten vorhanden ist. Planern und Ausführenden fehlt oft Gewerke übergreifendes Wissen [8]. Unkenntnis über die Arbeit des anderen (und daraus resultierende Folgeprobleme) führt dazu, dass Schnittstellen beispielsweise zwar am Plan wahrgenommen werden (z.B. Leitungsführung in der Fußbodenkonstruktion mit Rohrdurchführungen durch den Abdichtungshochzug in den Schacht; Leitungsführung in der Trockenbauwand), aber kein Bewusstsein für die Auswirkungen von solchen nicht vollumfänglich gelösten Detailpunkten vorhanden ist (z.B. zu wenig Platz zwischen den Rohren um sie entsprechend in die Abdichtung einzubinden; Trockenbausteher zu wenig breit um ein 50er Abwasserrohr mit Muffe herstellerkonform durchzuführen…) [9]. Da solche Notwendigkeiten anderer Gewerke nicht erkannt werden, findet auch oft eine schlechte Abstimmung über konstruktive Schnittstellen (wie z.B. Rohrdurchführungen; Leitungsführungen in Wänden oder Fußböden) statt [8]. Resultat sind permanente Änderungen in der Planung oder oft auch erst in der Ausführungsphase, Schuldzuweisungen, Bauverzögerungen und Mehrkosten. Gebäudetechnische Anlagen sind komplex und ihre Implementierung im Gebäude herausfordernd. Durch die starken Abhängigkeiten zum Bauwerk (Platzbedarf, baulich konstruktive Einbettung...), das notwendige enge Zusammenspiel von unterschiedlichen Planern und ausführenden Gewerken, sowie den stetig steigenden Vorgaben (Normen, Herstellervorgaben…) stellt dies oft eine Herausforderung und nicht selten eine schwer zu lösende Aufgabe dar. [9]

«Der klassische Bauablauf ist geprägt von Schnittstellenproblemen, Bearbeitung in der falschen Reihenfolge, Änderungen, fehlender (Detail-)Planung, terminlicher Unzuverlässigkeit der Beteiligten, Störungen von Externen, Lieferproblemen etc. Diese Probleme führen zu deutlichen Beeinträchtigungen des Bauablaufs. Viele dieser Faktoren stehen in Wechselwirkung zueinander, sodass sich die Probleme gegenseitig hochschaukeln. Die Komplexität der Baustelle nimmt stetig zu». [10]

Die bisher gängige Art und Weise Projekte zu planen und zu bauen muss sich angesichts dieser grundlegenden Probleme radikal verändern um die hohen Systemkomplexitäten die gerade in Bezug auf die TGA und ihre Schnittstellen zum BAU handhabbar zu machen. Viele dieser konstruktiven Schnittstellen zwischen BAU und TGA, kehren in gleicher oder sehr ähnlicher Weise in vielen Projekten wieder. Auch wenn wir weiterhin Großteils Gebäude bauen, die an sich Prototypen darstellen, ist es nur eine Frage des Zooms um immer wiederkehrende gleiche Bausteine, konstruktive Schnittstellen und Prozesse sichtbar zu machen. [9] Dafür ist es aber notwendig das geschichtlich verankerte Unikatdenken aufzubrechen [11].

Gerade im Fall von Badezimmern bietet es sich an, systematisch klassische, immer wiederkehrende konstruktive BAU/TGA Detailpunkte zu identifizieren und diese vollumfänglich zu lösen. Ebenso gilt es, standardisierte Lösungen für die Installationsführung zu definieren und der Branche niederschwellig und in frühen Planungsphasen einfach nutzbar zugänglich zu machen. Nur so kann hohe Planungssicherheit, ohne dauernde Änderungsschleifen und damit verbundenen Zusatzaufwände aufgrund von nicht bedachten Problemstellen erreicht werden. Dies führt zu einer deutlichen Komplexitätsreduktion für Planer, aber auch in weiterer Folge zu einer erheblich verbesserten Ausführungsqualität, was gerade im Kontext von Holzbauten in Räumen mit vielen wasserführenden Installationen von hoher Relevanz ist.

1.3. Problemfeld 3: Modularisierung der TGA

Im Holzbau gibt es einen sehr hohen Vorfertigungsgrad was die Holzkonstruktion an sich betrifft. Die Bandbreite reicht von einzelnen Trägern, über Wände oder Decken bis hin zu fix fertig ausgestatteten Raumzellen. Vor allem hinsichtlich Bauzeit ist der Holzbau daher dem mineralischen Massivbau meist weit überlegen. TGA- Installationen dagegen sind noch relativ selten im größeren Stil modularisiert bzw. gar standardisiert. Aktuelle Beispiele für die Modularisierung von größeren TGA- Bauteilen stellen Installationsregister in Wohnbauten [12] oder Installationsmodule für TGA- Trassen im Gangbereich von Bürogebäuden [13] dar.

Der Großteil der gesamten TGA- Installation wird allerdings nach wie vor auf der Baustelle errichtet und teilweise auch erst dort mit anderen Gewerken koordiniert. Dafür gilt es Materialien zeitlich passend zu liefern oder wenn notwendig zwischenzulagern, Verfügbarkeiten von Facharbeitern zu berücksichtigen und natürlich die Verkettungen zwischen TGA und BAU Gewerken zu bedenken. Montagearbeiten müssen so oft unter Zeitdruck und mit beschränktem Arbeitsraum stattfinden was natürlich wesentliche Auswirkungen auf Qualität, Kosten und Termine hat. [13] Zudem braucht es aktuell auf der Baustelle Facharbeiter, welche die komplette Installation ihres Gewerkes fachgerecht durchführen können und bei nicht vollständiger oder mangelhafter Planung in der Lage sind, dies erstens zu erkennen und zweitens dennoch eine «richtige» Installation durchführen und mit den anderen Gewerken koordinieren. Angesichts des bereits vorherrschenden und noch steigenden Fachkräftemangels wird dies zunehmend erfolgskritisch. Analog zum Automobilbau ist es jedenfalls zielführend industrielle Vorfertigung zu forcieren. Wenige, immer wiederkehrende Produktionsschritte können einfach von kurzfristig angelerntem Personal übernommen werden.

Zwar hat es sich im Bereich von Sanitärinstallationen quasi zum Standard entwickelt einzelne kleine Module wie Sanitärgestelle (WC- Gestell, Gestell für Waschbecken…) Boxsysteme oder Ausschubmodulsysteme zu verwenden. Allerdings stellen diese immer nur einen kleinen Teil einer kompletten Badezimmerinstallation dar. Sie bringen zwar Vorteile im Bau, allerdings keine nennenswerten Vorteile in der Planung, da sie keine standardisierte Gesamtlösung für eine Badezimmerinstallation darstellen.
Im Gegensatz dazu stehen Installationsregister – also komplette Installationswände oder Schächte. Der Einsatz solcher Installationsregister nimmt zu, allerdings handelt es sich dabei nicht um standardisierte Module die sich mit gewissen fixen Abmessungen im Produktsortiment von Herstellern befinden, sondern um individuell für einzelne Bauaufgaben geplante und gefertigte Module. Damit lässt sich die Bauzeit deutlich verkürzen und die Qualität wird gesteigert, was vor allem hinsichtlich Wasserschäden von großer Bedeutung ist.

Allerdings bleibt die eigentliche Planungsleistung für das Badezimmer weiter beim Architekten (Bauwerk) bzw. beim TGA- Planer (Installation). Solche Installationsregister leisten aktuell also noch keinen Beitrag im Sinne der Komplexitätsreduktion in der Planung vor allem hinsichtlich von baulichen Schnittstellen (die Rohrdurchführung durch z.B. den Abdichtungshochzug gibt es nach wie vor). Noch stehen Installationsregister automatisch für eine holzbauadäquate Installationsführung. Meist werden dennoch viele Rohre im Fußbodenbereich verlegt obwohl Vorsatzschalen (die als Installationsregister ausgeführt werden könnten) in Badezimmern gängig sind. Allerdings dienen diese oft nur dazu, notwendige Sanitärgestelle und einige Leitungen unterzubringen. Die komplette Leitungsführung wird nicht konsequent in Schächten, Vorsatzschalen oder Installationswänden untergebracht. Viele Leitungen verlaufen erst wieder im Fußboden und führen zu den zuvor erläuterten Problemen.

1.4. Was braucht es daher?

Aufgrund der dargelegten Probleme müssen allgemein anwendbare Standardlösungen für Badzimmerinstallationen entwickelt werden, die sowohl die Problematik von Feuchteschäden im Holzbau, als auch die Komplexitätsproblematik in Planung und Ausführung berücksichtigen. Gut durchdachte Modulbaulösungen für die TGA- Installationen sind jedenfalls

anzustreben. Nur so kann die Qualität – und vor allem auch der Feuchteschutz des Holzbaues – bei gleichzeitiger Komplexitätsreduktion für Planer und Ausführende gesteigert werden. Zudem sind solche Modulbaulösungen eine wirksame Maßnahme um dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken und um eine deutlich höhere Kosten- und Terminsicherheit zu erzielen. Und zu guter Letzt: Eine Bestandsdokumentation bekommt man automatisch mitgeliefert.

Lange Zeit hat es an Forschung hinsichtlich TGA- Modularisierung für Badezimmer gemangelt. Möglicherweise wegen der langläufigen Meinung, jedes Bad sei individuell und daher eine Standardisierung und Modularisierung von größeren TGA- Bauteilen nicht möglich. Im Forschungsprojekt «CLT_Plumbing_Design» hat man sich unter anderem der Fragestellung der TGA- Modularisierung im Badezimmer angenommen und Installationskonzepte entwickelt, die sowohl holzbauadäquat als auch modular anwendbar sind. Diese Installationskonzepte werden im folgenden Kapitel vorgestellt und näher erläutert.

2. Installationskonzepte für die TGA- Modularisierung in Badezimmern

Im Forschungsprojekt «CLT_Plumbing_Design» wurden als Basis für möglichst generisch anwendbare Badezimmerentwürfe und Installationskonzepte, sowie den später darauf aufbauenden automatisierten Entwurfsprozess über 1100 Badezimmergrundrisse analysiert und kategorisiert. Ziel war es unter anderem, besonders häufige Badezimmertypen zu identifizieren um in weiterer Folge standardisierte Installationskonzepte sowie immer wiederkehrende Module für die TGA abzuleiten zu können. Als Kategorisierungskriterien dienten die Art der Sanitärausstattung (Dusche, Badewanne, WC...) sowie die Anordnung dieser Sanitärausstattung. Beide Kriterien spielen eine wesentliche Rolle für die Installationsausbildung. [7]

Die folgende Abbildung zeigt besonders häufige identifizierte Badezimmertypen. Die gezeigten Abmessungen stellen die jeweiligen Mindestabmessungen für Sanitärgegenstände und deren notwendigen Bewegungsflächen lt. ÖNORM H 5411 [14] sowie den Raum an sich dar. Eine holzbauadäquate Leitungsführung wurde unter anderem mittels Schächten und Vorsatzschalen bzw. Installationswänden realisiert (ebenfalls jeweils mit Mindestabmessungen für eine zentrale Warmwasserversorgung dargestellt).

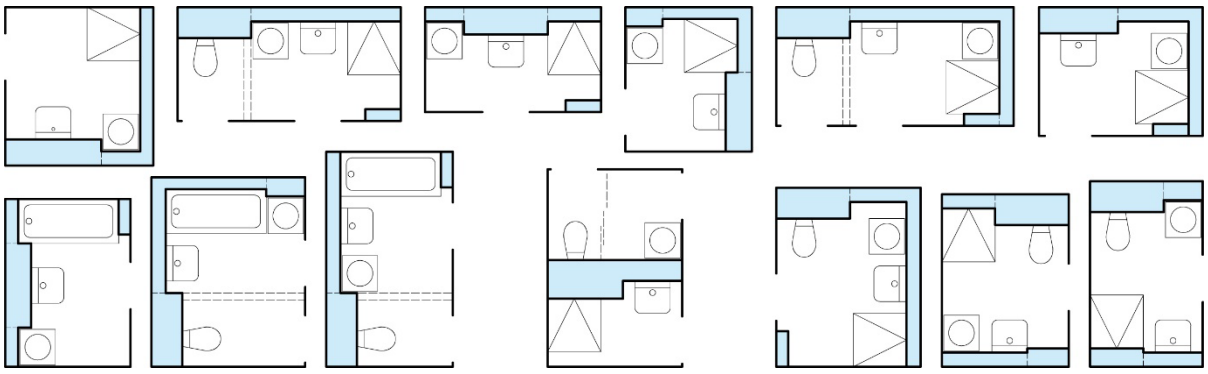


Abbildung 1: Häufige Badezimmertypen mit Installationsbereichen für eine holzbauadäquate Leitungsführung

Für die dargestellten (sowie einige weitere) Typen wurde eine detaillierte und ganzheitliche Planung des Badezimmers, insbesondere der Schacht- und Vorsatzschalen- bzw. Installationswandbereiche inkl. der Installationen, durchgeführt. Besonderes Augenmerk dabei wurde auch auf eine Abdichtung in den Installationsbereichen und damit einhergehende Platzbedarfe (andichten Steigleitungen/Abwasserfallrohr) gelegt.

Folgende Rahmenbedingungen liegen den Planungen zugrunde: 4 geschossiger Holzwohnbau in Österreich, idente Badezimmer direkt übereinanderliegend (durchgehende Schächte), holzbauadäquate Leitungsführung, Abdichtung auf der Rohdecke auch in den Installationsbereichen.

Diese durchgeplanten Badezimmertypen in Mindestgröße können von Planern direkt bereits in frühen Planungsphasen (z.B. Vorentwurf) verwendet werden, bzw. bilden den Grundstein für einen automatisierten Entwurfsprozess basierend auf einem online Konfigurator auf den zum Abschluss des Beitrages noch ein kurzer Ausblick gegeben wird.
Diese Badezimmertypen beinhalten viele grundlegende Regeln (Platzbedarfe für Sanitärgegenstände und deren Bewegungsflächen, Platzbedarfe für holzbauadäquate Leitungsführung und Abdichtung) und stellen damit sicher, dass permanente Änderungsschleifen entfallen und eine holzbauadäquate Installation von Beginn an mit richtiger Lage und ausreichendem Platzbedarf eingeplant ist. Die Möglichkeit zur Ausführung sämtlicher Installationsbereiche als vorgefertigte Installationsregister wird damit ebenfalls von Anfang an sichergestellt.

Da es sich bei den Badezimmertypen um besonders häufig vorkommende Badezimmer mit Mindestabmessungen handelt, könnten diese für eine Grundkollektion an standardisierten Installationsregistern, die fix im Produktportfolio von Herstellern verfügbar sind herangezogen werden.
Sollen in Planungen größere Badezimmerabmessungen realisiert werden, können grundsätzlich dieselben Installationskonzepte verwendet werden. Die Schachtmodule können unverändert mit ihrem Mindestmaß übernommen werden. Vorsatzschalen sind in der Länge anzupassen (Tiefe unverändert).

Im nächsten Unterkapitel wird näher auf unterschiedliche Schachtausprägungen eingegangen und im Anschluss deren Implementierung in verschiedene Installationskonzepte basierend auf den Badezimmertypen aus Abbildung 1 anhand von BIM Modellen gezeigt.

2.1. Schachtausprägungen

Ausgehend von der Kategorisierung und detaillierten Durchplanung der identifizierten häufigen Badezimmertypen konnten verschiedene Schachtausprägungen abgeleitet werden, die in sehr vielen Badezimmergrundrissen Anwendung finden können und daher einen wichtigen Beitrag zur TGA- Modularisierung und Standardisierung von Installationskomponenten darstellen.
Der Hauptschacht befindet sich grundsätzlich hinter dem WC bzw. hinter dem Waschbekken, wenn kein WC vorhanden ist. Diese Schachtpositionen erlauben einerseits die Zugänglichkeit der Installationsbereiche über Revisionstüren (z.B. neben/über dem WC, bzw. unter dem Waschbecken/hinter dem Spiegel) da es sich um keine spritzwasserbelasteten Bereiche handelt. Andererseits kann das WC so über eine sehr kurze Leitung direkt an den Fallstrang angebunden werden. Diesem Grundsatz der kurzen Leitungslängen folgend, sind die Heizungssteigleitungen grundsätzlich nicht im Hauptschacht angeordnet, sondern in einem separaten Heizungsschacht an der Gangwand. Dadurch befinden sie sich an einem zentralen Ort in der Wohnung, was die Leitungslängen positiv beeinflusst. Zudem kann der Heizungsverteiler direkt am Heizungsschacht in der Gangwand positioniert werden. Eine Miteinbindung des Heizungsverteilers in die Abdichtung auf der Rohdecke des Badezimmers wird damit ebenfalls einfach möglich, was eine weitere wichtige Maßnahme zum Feuchteschutz der Holzkonstruktion darstellt. Die Schachtausstattung der Hauptschächte hängt von der Art der Warmwasserbereitung ab. Bei zentraler Warmwasserversorgung sind die Hauptschächte wie folgt belegt: Abluft Bad (bzw. auch WC), Trinkwasser kalt, Trinkwasser warm, Trinkwasser warm Zirkulation, Abwasser, Notentwässerung. Wird das Warmwasser dezentral erzeugt (z.B. Boiler im Bad) können die Schächte entsprechend kleiner ausfallen, da die beiden Warmwassersteigleitungen nicht notwendig sind. [7]

Den Rohrleitungsdimensionierungen liegt ein 4-geschossiges Gebäude (4 gleiche Bäder/ WCs übereinander) sowie die entsprechenden österreichischen Normen zugrunde. Die Schächte sind aus Brandschutzgründen [15], aber auch aus Gründen der besseren Abdichtbarkeit, geschoßweise geschottet. Zur Erhöhung des Feuchteschutzes der Holzkonstruktion in diesen hochinstallierten Bereichen wird die Abdichtung auf der Rohdecke in den Schachtbereich (wie auch in den Vorsatzschalen- bzw. Installationswandbereich) gezogen. Entscheidend für die Dichtigkeit der Abdichtung sind das richtige Andichten bzw. der entsprechende Platzbedarf dafür rund die Steigleitungen bzw. rund um das Abwasserfallrohr. Detailliert wird dies in [7] erläutert. Durch das Abdichten der Schachtbereiche kann eine Schadensausbreitung, wie sie sonst oft über mehrere Geschosse vorkommt,

wirksam verhindert werden. Zudem ist zur raschen Ableitung im Falle eines Wasserschadens eine Notentwässerung im Schachtbereich in den Installationskonzepten integriert. Die Notentwässerung lässt auch eine Schadensdetektion zu (nicht direkt an den Abwasserfallstrang angeschlossen) und kann zusätzlich durch Sensorik unterstützt werden. Bei den gezeigten Installationskonzepten wird ein Abstand zwischen den Steigleitungen von 10 cm zum fachgerechten Abdichten aber auch zum Aufbringen der Rohrdämmung [16] eingehalten. Die dichte Einbindung des Abwasserfallstrangs stellt üblicherweise ein Problem dar, da Abzweiger über die Abwässer von Duschen oder Badewannen in den Fallstrang geleitet werden, oft sehr tief im Bereich der Rohdeckenoberkante und damit in der Abdichtungsebene liegen. Dichtmanschetten müssen allerdings an ebenen Rohren anliegen und nicht im Bereich von Abzweigern oder Muffen. Alternativ einsetzbare Flüssigkunststoffe haften oft nicht oder nicht gut auf Rohrleitungsmaterialien aus diversen Kunststoffen. Daher wurde für solche Situationen im Projekt «CLT_Plumbing_Design» eine Lösung mit Deckensprung im Schachtbereich entwickelt (siehe 3D Modelle der Installationskonzepte). Die Abdichtungsebene wird im Schachtbereich dadurch abgesenkt und ein andichten unterhalb des Dusch-/Badewannenabzweigers am ebenen Rohr auch mittels Dichtmanschette möglich. Maßgebend für die Positionierung der Rohre im Schacht ist das WC bzw. das Abwasserfallrohr und die verfügbaren Rohrbögen und Abzweiger dazwischen. Um tatsächlich in der Praxis baubare Lösungen zu generieren, wurden die BIM- Modelle mit BIM- Objekten basierend auf realen Produkten eines großen Herstellers von Installationsprodukten modelliert. [7]

Die folgenden Installationskonzepte zeigen ausgewählte, unterschiedliche Anwendungen der erläuterten Schachtausprägungen. Sämtliche Installationslösungen basieren auf österreichischen Gesetzen bzw. Normen sowohl was die Installation an sich betrifft, aber auch hinsichtlich der Abmessungen und Platzbedarfe der Sanitärgegenstände, der Abdichtung sowie der Brandschutzmaßnahmen und des Schallschutzes. Da in Österreich mittlerweile ein Großteil der Wohnungen barrierefrei adaptierbar errichtet werden muss, ist dies bei den gezeigten Konzepten ebenfalls berücksichtigt (Bewegungsflächen der Sanitärgegenstände, Wendekreise, Anfahrtsbereiche für Türen). Diese Badezimmertypen sind jeweils in der Mindestabmessung für eine barrierefrei adaptierbare Ausführung dargestellt. Es werden bewusst unterschiedliche Schachtbelegungen (zentrale bzw. dezentrale Wasserversorgung) gezeigt. Sämtliche Badezimmertypen und deren Installationskonzepte wurden für beide Warmwasserversorgungsarten als BIM- Modell durchgeplant und sind via Online Konfigurator «CLT_Plumbing_Designer» auf den am Ende des Beitrages kurz eingegangen wird verfügbar.

2.2. Installationskonzept 1 – Reihe

Die folgende Abbildung zeigt zwei Badezimmertypen die in Reihe installiert sind – d.h. alle Sanitärgegenstände sind an einer Wand angeschlossen und werden über diese ver- und entsorgt. Beim linken Badezimmertyp befindet sich der Hauptschacht hinter dem Waschbecken, beim rechten Typ liegt ein WC direkt an das Badezimmer angrenzend und der Schacht befindet sicher daher hinter dem WC. Diese Schachtausprägungen eignen sich besonders gut zur Standardisierung von TGA- Modulen, da sie besonders häufig vorkommen. Selbiges gilt für die Heizungsschächte, die jeweils wie zuvor erläutert, an der Gangwand situiert sind und auch sehr oft in dieser Art und Weise als Schachtmodul realisiert werden können.
Da die Badewanne nicht allzu weit vom Abwasserfallrohr entfernt liegt (Andichten unter dem Abzweiger auf der Rohdecke möglich), ist kein Deckensprung im Schachtbereich erforderlich. Beim rechten Typ mit der Dusche ist der Deckensprung im Schachtbereich notwendig. Vom Badezimmer aus ist dieser aufgrund der durchgehenden Beplankung nicht erkennbar.

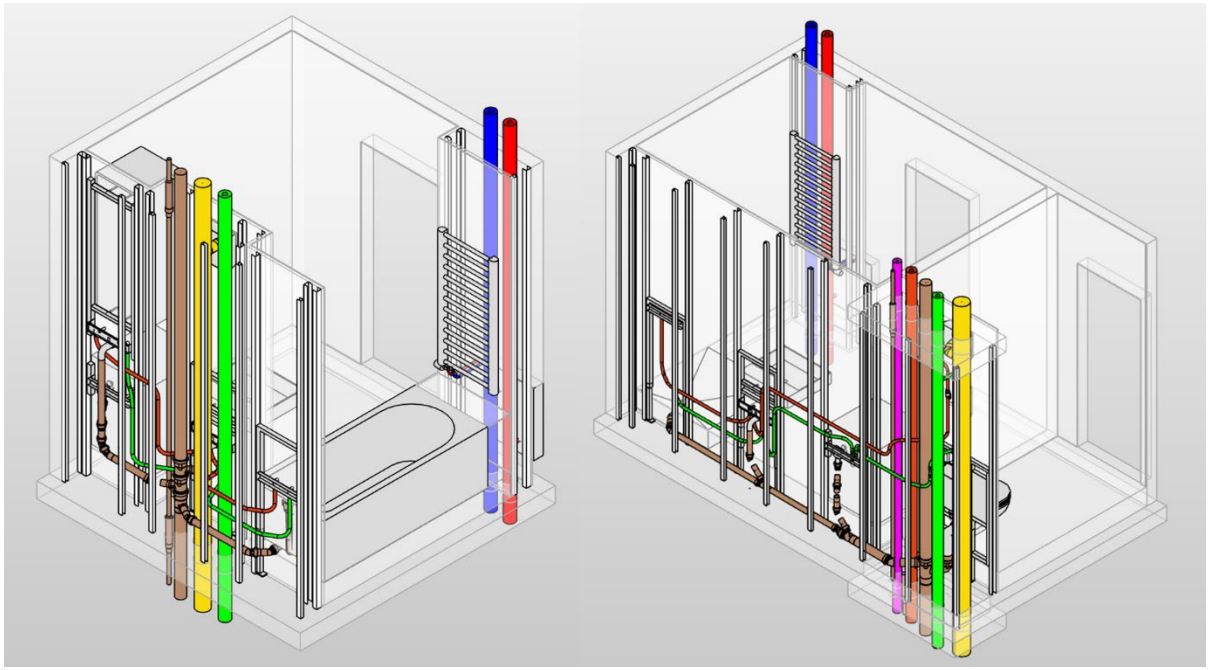


Abbildung 2: In Reihe installierte Badezimmertypen (links: Schachtmodul Waschbecken – dezentrale WW Versorgung und Schachtmodul Heizung; rechts: Schachtmodul WC – zentrale WW Versorgung und Schachtmodul Heizung)

Um Verbindungsstellen bei den Trinkwasserleitungen aufgrund ihrer Fehleranfälligkeit möglichst weitgehend zu reduzieren, werden Doppelanschlusswinkel eingesetzt und das Wasser über diese, an den Sanitärgestellen hinter den Sanitärobjekten durchgeschliffen. Zusätzliche T-Abzweiger können so Großteils vermieden werden. Dieses Installationsprinzip wird bei allen gezeigten Installationskonzepten angewandt.

2.3. Installationskonzept 2 – über Eck

Sind Sanitärgegenstände an zwei nicht gegenüberliegenden Wänden positioniert, kann die Installation über Eck mit zwei Vorsatzschalen/Installationsregistern erfolgen. Grundsätzlich ist der Einsatz der Schachtmodule hinter dem WC bzw. dem Waschbecken wie bei Installationskonzept 1 gezeigt möglich. Bei der Anordnung der Sanitärgegenstände über Eck kann es aber auch vorkommen, dass der Hauptschacht an der Gangwand liegt und sämtliche Steigleitungen, also auch Heizungssteigleitungen, in einem Schacht positioniert werden können (siehe Abbildung 3, Typ rechts). Zudem bietet es sich an, den Heizungsschacht hinter der Waschmaschine bzw. dem Boiler zu situieren, wenn diese an der Gangwand positioniert sind (siehe Abbildung 3, Typ links).
Sowohl der Heizungsschacht hinter der Waschmaschine, als auch der Schacht hinter dem Waschbecken mit allen Steigleitungen sind häufig in Badezimmergrundrissen einsetzbar und stellen damit weitere potenzielle Schachtmodule dar.

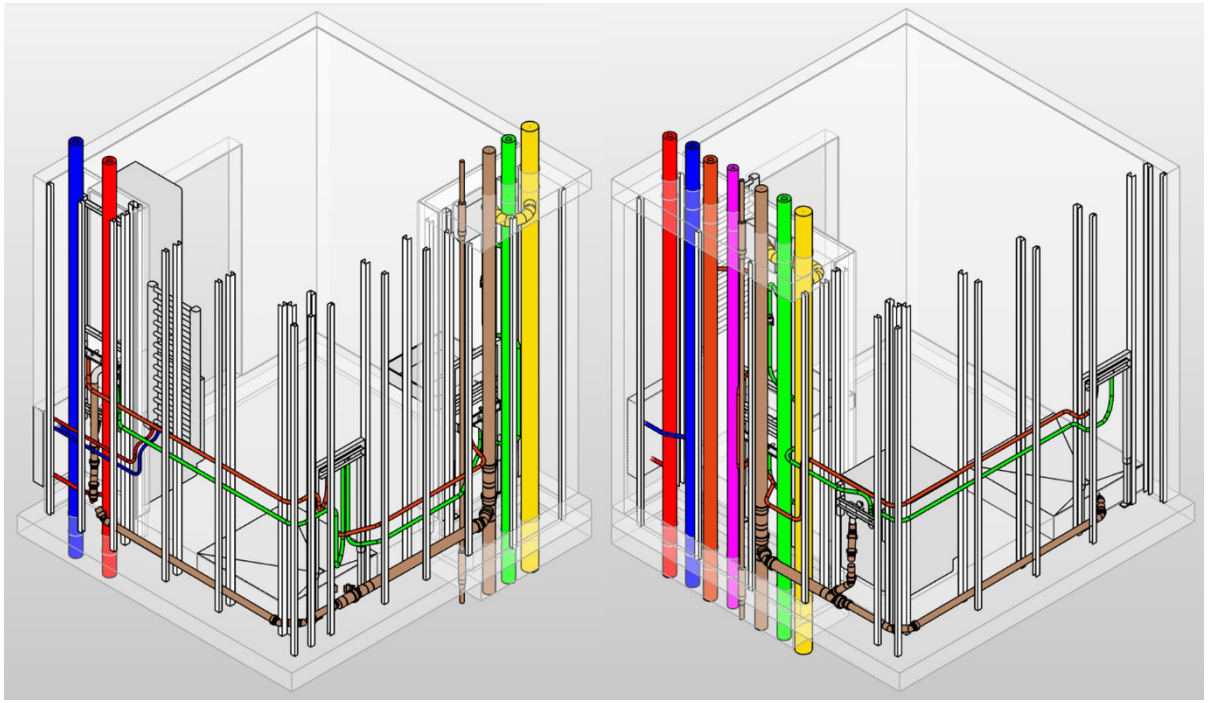


Abbildung 3: Badezimmertypen mit übers Eck führenden Installationszonen (links: Schachtmodul Waschbecken – dezentrale WW Versorgung und Schachtmodul Heizung hinter Waschmaschine; rechts: Schachtmodul Waschbecken All in – zentrale WW Versorgung)

2.4. Installationskonzept 3 – gegenüber

Sind Sanitärgegenstände an gegenüberliegenden Wänden angebracht, kann auch ohne dritte Vorsatzschale/Installationsregister holzbauadäquat installiert werden. Eine Leitungsführung im Fußboden ist nicht notwendig und kann, wie die folgende Abbildung 4 zeigt, mit einem zweiten Abwasserfallrohr (im Heizungs- oder Duschschacht) und Trinkwasserleitungen in der abgehängten Decke umgangen werden.

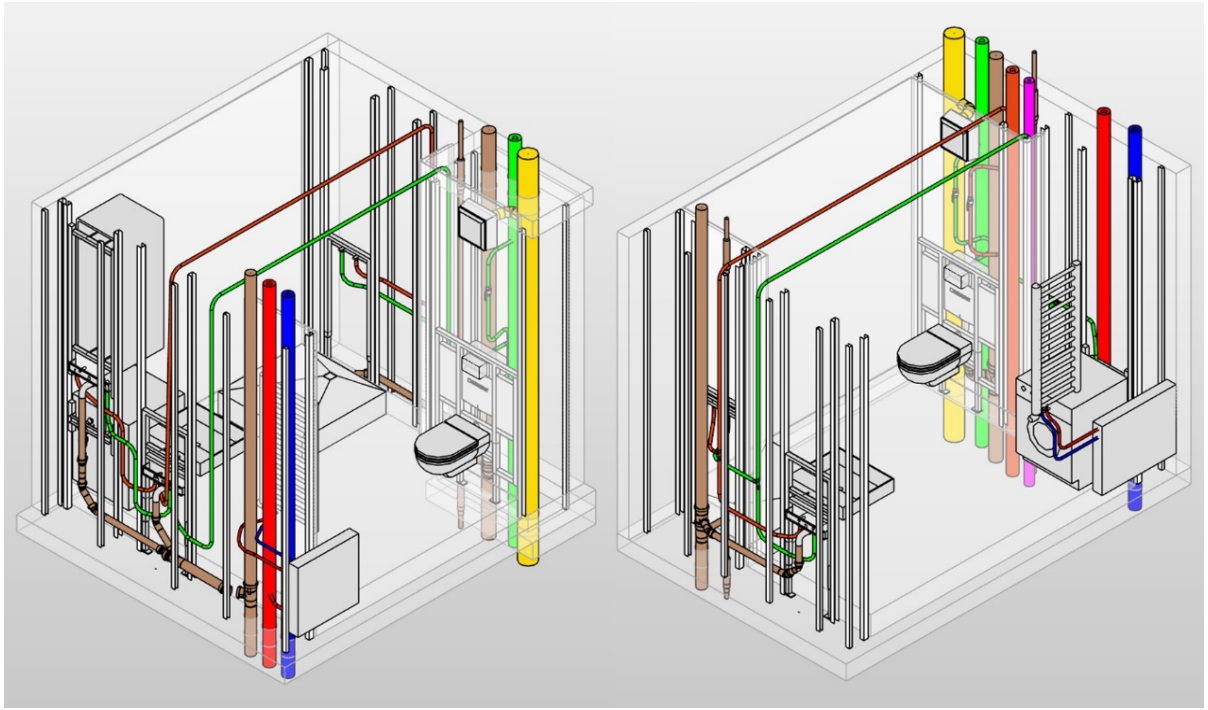


Abbildung 4: Badezimmertypen mit gegenüberliegenden Installationszonen (links: Schachtmodul WC – dezentrale WW Versorgung und Schachtmodul Heizung/Abwasser; rechts: Schachtmodul WC – zentrale WW Versorgung und Schachtmodul Dusche)

Die einzelnen Installationsregister können mit den Standardschachtgrößen (z.B. Schachtmodul WC) wiederum problemlos vorgefertigt werden. Das Schachtmodul Heizungssteigleitungen inkl. Abwasserfallrohr eignet sich aufgrund seiner vielen Einsatzmöglichkeiten ebenfalls sehr gut für die modulare Vorfertigung. Liegt die Dusche nicht an der Wand mit dem Hauptschacht, bzw. dem Heizungsschacht, kann ein eigener Schacht mit dem zusätzlichen Abwasserfallrohr direkt hinter der Dusche vorgesehen werden. Eine Integration der Notentwässerung ist hier ebenfalls möglich (höheres Feuchteschadenspotenzial im Duschbereich). Die Zugänglichkeit zu diesem Schacht sollte über Revisionstüren sichergestellt werden, die neben dem Duschbereich liegen (kein Spritzwasser).

Die Montage und der Anschluss der Trinkwasserleitungen in der abgehängten Decke erfolgt auf der Baustelle. Die Verlegung in der abgehängten Decke hat im Vergleich zur Fußbodenkonstruktion den Vorteil, dass allfällige Wasserschäden viel früher erkannt werden können und eine Zugänglichkeit weitaus einfacher ist, als bei Leitungen unter dem Estrich in der Fußbodenkonstruktion.
Die Installationskonzepte für gegenüberliegende Installationen lassen sich sehr vielfältig einsetzen und liefern gleichzeitig platzsparende und effiziente holzbauadäquate Lösungen. Durch die Installationsbereiche in zwei gegenüberliegenden Wänden (davon keine Gangwand) erhöht sich die Chance, dass auch die Küche direkt an einen dieser Installationsbereiche angrenzt und die notwendigen Kücheninstallationen ebenfalls direkt integriert werden können.

2.5. Installationskonzept 4 – zentral

Einen besonderen Stellenwert, unter den in diesem Beitrag gezeigten Installationslösungen, nimmt die zentrale Installationsführung in einer einzigen Installationswand ein. Mit dieser Lösung wird es möglich, die komplette wasserführende Sanitärinstallation einer Wohnung in einer Wand unterzubringen. Die Heizungssteigleitungen sowie der Heizungsverteiler finden ebenso Platz in der Installationswand die zwischen dem Bad und dem WC/ Abstellraum (je nach Zugänglichkeitsmöglichkeit als ein oder zwei Räume ausführbar) situiert ist. Stirnseitig kann, wenn es der Grundriss zulässt, zudem noch die Küchenspüle bzw. der Geschirrspüler positioniert und angeschlossen werden.

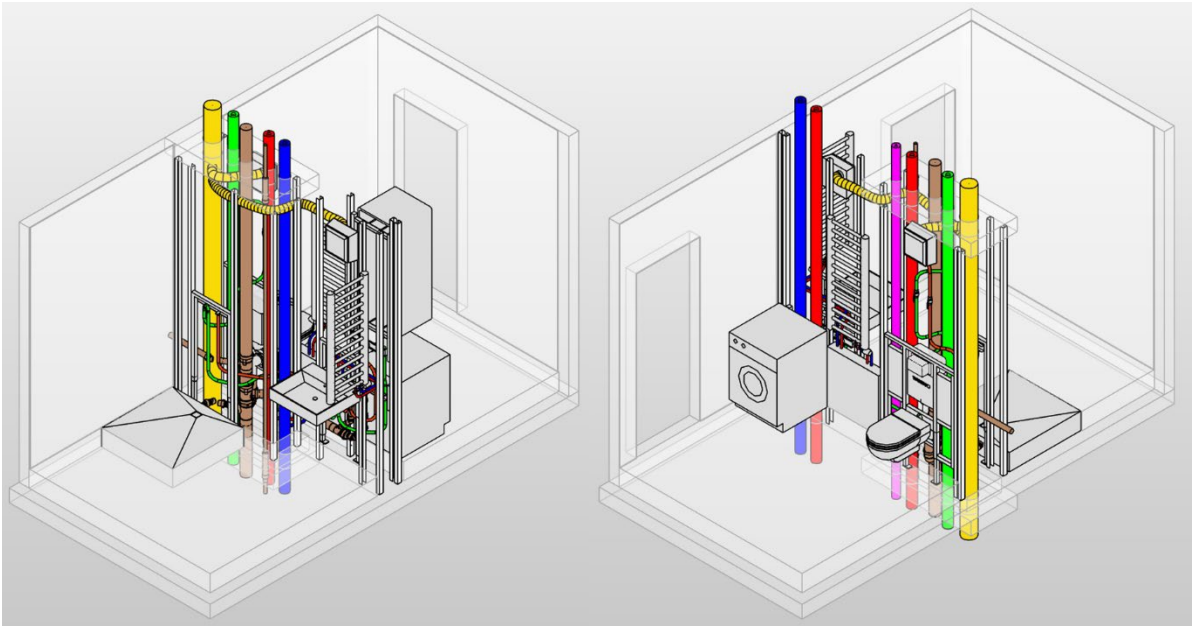


Abbildung 5: Badezimmertyp mit zentraler Installationswand (links: dezentrale WW Versorgung; rechts: zentrale WW Versorgung)

Die auf Abbildung 5 gezeigten Installationskonzepte sind sehr platzsparend (obwohl barrierefrei!) und können mit kleinen Änderungen der Abmessungen auch mit einer Badewanne statt einer Dusche ausgeführt werden. Diese Lösung ist aufgrund ihrer Kompaktheit ideal für die Vorfertigung und aufgrund der zwei- oder eventuell sogar dreiseitigen Nutzung des Installationsregisters, der damit einhergehenden hohen Installationsdichte und der geringen

Leitungslängen sehr kostengünstig im Vergleich zu weniger kompakten Badezimmerinstallationen. Mit einer zusätzlichen Abdichtung auf der Rohdecke inkl. sauberer Einbindung der Steigleitungen bzw. des Abwasserfallrohres und einer Notentwässerung lässt sich einfach und kostengünstig eine sehr sichere und holzbauadäquate Badezimmer Installationslösung realisieren, die zudem prädestiniert ist für die Modularisierung und Vorfertigung.
Aufgrund der vielen Vorteile wurde daher im Zuge des Projektes «CLT_Plumbing_Design» untersucht, ob sich diese Lösung gut in sehr viele Wohnungsgrundrisse implementieren lässt. Dafür wurden nochmals die über 1100 Wohnungsgrundrisse analysiert und es zeigte sich, dass in fast 50% eine Implementierung ohne wesentliche Änderungen der Aufenthaltsräume möglich ist. Aufgrund des hohen Potenzials dieser Lösung wurde im Rahmen des Forschungsprojektes auch ein Mock-up dieser Lösung vom Projektpartner mhs Installationssysteme gebaut (siehe Abbildung 6 links bzw. Mitte). Um eine besonders einfache und zugleich sichere Abdichtung innerhalb der Installationswand zu realisieren, wird das Installationsregister auf ein gekantetes Blech geschweißt, dass einerseits die Unterkonstruktion des Installationsregisters darstellt, und andererseits im Bereich der Installationswand zugleich die Abdichtungsfunktion übernimmt. Das Blech verfügt zudem über einen Überstand vor die Installationswand was einen dichten Anschluss der Abdichtung auf der Rohdecke im Badezimmer/WC einfach zulässt.



Abbildung 6: Mock-up Zentralvariante (links, Mitte). Mock-up Schachtmodul WC mit aufgeschweißten Hüllrohren zur dichten Rohreinbindung sowie neuartiger Notentwässerung

In einem weiteren Mock-up (Schachtmodul WC, Abbildung 6 rechts) wurde die Andichtung der Steigleitungen bzw. des Abwasserfallrohres mit direkt auf das Blech aufgeschweißten Hüllrohren sowie die Notentwässerung (Ableitung in darunterliegenden WC Spülkasten) weiterentwickelt. In den gezeigten Mock-ups wurde immer das mhs Strangsystem verbaut, übliche Rohrsysteme sind aber ebenso möglich.

3. Zusammenfassung

Unerkannte Feuchteschäden können massive Schäden an Holzkonstruktionen verursachen. Die vorgestellten Installationskonzepte helfen, den Schutz der Holzkonstruktion in Bädern von mehrgeschossigen Wohnbauten deutlich zu verbessern und liefern gleichzeitig einen wichtigen und dringend notwendigen Beitrag zur Standardisierung und Modularisierung von TGA Installationen in Badezimmern. Die gezeigten Lösungen sind sehr breit anwendbar und können auch im mineralischen Massivbau eingesetzt werden. Zudem führen die gezeigten Installationslösungen zu einer deutlichen Komplexitätsreduktion in Planung und Ausführung, reduzieren die Planungs- und Bauzeiten, führen zu einer Qualitätssteigerung und wirken dem Fachkräftemangel entgegen. [7] Die ganzheitliche Betrachtung und baupraktische Umsetzbarkeit der Konzepte wurde mit dem Bau von zwei Mock-ups demonstriert.

4. Ausblick

Die gezeigten Installationskonzepte bilden eine wichtige Basis für die Entwicklung eines dringend notwendigen neuen automatisierten Planungsprozesses für holzbauadäquate Badezimmer. Im Rahmen des Forschungsprojektes «CLT_Plumbing_Design» wurde dafür der Konfigurator «CLT_Plumbing_Designer» entwickelt, der ab Sommer 2024 frei zugänglich sein wird. Mit diesem Online-Tool können Bäder und WCs in frühen Planungsphasen auf Basis der vorgestellten Konzepte einfach und niederschwellig holzbauadäquat konfiguriert werden (nicht barrierefrei bzw. barrierefrei adaptierbar). Die erforderlichen Schachtgrößen, Vorsatzschalen- bzw. Installationswandtiefen und Platzbedarfe der Sanitärobjekte sind als Regelsätze implementiert. Neben 2D- Grundrissen der konfigurierten Bäder werden via «CLT_Plumbing_Designer» auch Leitdetails, BIM- Modelle der häufigsten Badezimmertypen (jeweils in Mindestgröße barrierefrei adaptierbar) sowie ein Script für die automatisierte Badezimmerplanung zum Download bereitgestellt. Mit wenigen Klicks kann sich der Planende damit ein BIM- Architekturmodell (Wände, Schächte, Vorsatzschalen, Türen und Sanitärgegenstände) des konfigurierten Bades in einer BIM- Modellierungssoftware erstellen lassen. [7] Zudem wird aktuell an der automatisierten BIM-TGA Modell Erstellung gearbeitet. Die Scripts sollen ebenfalls via «CLT_Plumbing_Designer» der Branche zugänglich gemacht werden und analog zum automatisierten BIM- Architekturmodell eine automatisierte Installationsplanung basierend auf umfassenden Regelsätzen innerhalb weniger Minuten ermöglichen.

5. Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des Basisprogramm/Collective Research Forschungsprojektes «CLT_Plumbing_Design – Computergestützter Planungsprozess zur automatisierten Gestaltung von Nassräumen für den Holz-Massivbau» (Nr. 885708) gefördert durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG). Unser Dank gilt auch den «CLT_Plumbing_Design» Projektpartnern Cree GmbH, Haas Fertigbau Holzbauwerk GmbH & Co.KG, KLH Massivholz GmbH, Mayr-Melnhof Weiterverarbeitungs Holding GmbH, MHS Montagesysteme für Heizung und Sanitär GmbH, Stora Enso Wood Products GmbH und W. u. J. Derix GmbH & Co.KG sowie insbesondere auch unserem wissenschaftlichen Projektpartner der holz.bau forschungs gmbh unter der Leitung von Prof. G. Schickhofer und seinem Team G. Silly, A. Thiel und D. Matzler.

6. Literaturverzeichnis

[1] Schickhofer, G. und Schmid, G.: Gebäudetechnik für Geschoßbauten in Holz-Massivbauweise. In Versorgen und Umhüllen im Holzbau. Schnittstellen des Holzbaus zur Gebäude- und Fassadentechnik. 1. Klagenfurter Holzbau-Fachtagung. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz 2014.

[2] Monsberger, M. und Partl R.: Gebäudetechnik – Eine Schlüsseldisziplin im modernen Holzbau. In Versorgen und Umhüllen im Holzbau. Schnittstellen des Holzbaus zur Gebäude- und Fassadentechnik. 2. Klagenfurter Holzbau-Fachtagung. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz 2016.

[3] Mohrmann, M.: Wasserdichter Holzbau. Halten Abdichtungen ihr Versprechen? In Holzbau – die neue quadriga 2/2021. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2005.

[4] Knap, M., Nahrwold, F. und Pfullmann T.: Die Chart Show der Leitungswasserschäden. Schadensprisma.de 1/2018. www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/pdf/1/sp_1_2018_art1.pdf, abgerufen am 22.10.2023.

[5] ÖNORM B 3692 Planung und Ausführung von Bauwerksabdichtungen. Wien: Austrian Standards Institute 2014.

[6] Koppelhuber, D.: Zeit- und Kostenfallen vermeiden. Wirtschaftliche Betrachtungen zur TGA Planung im Holzbau. In Bauphysik-Forum 2019. Wien: Holzforschung Austria 2019

[7] Fortmüller, P., Silly, G., Matzler, D., Thiel, A., Schickhofer, G., Monsberger, M.: Concepts for timber-specific MEP installations and sealings in bathrooms of multi-story residential buildings. In Proceedings of International Structural Engineering and Construction 11(2) 2024 Developing Materials and Structures for Sustainable Engineering. Fargo: ISEC Press 2024.

[8] Mersch, F. und Rullán Lemke C.: Kooperation der Baugewerke: nur eine Frage der Kommunikation?. In Wertschätzung – Kommunikation – Kooperation: Perspektiven von Professionalität in Lehrkräftebildung, Berufsbildung und Erwerbsarbeit. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr. Johannes Meyer. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin 2016.

[9] Fortmüller, P., Monsberger, M.: Prozessorientierte und integrierte Schnittstellenplanung als Basis für eine konfliktreduzierte Gebäudetechnik-Integration im Baukörper. In Aktuelle Entwicklungen in Baubetrieb, Bauwirtschaft und Bauvertragsrecht: 50 Jahre Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Graz. Wiesbaden: Springer Vieweg 2019.

[10] Binninger, M., Wolfbeiß, O.: Taktplanung und Taktsteuerung bei weisenburger. In Lean Construction – Das Managementhandbuch – Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen. Berlin: Springer Gabler 2018.

[11] Kitzman, Q., Brenks, W.: Entwicklung von Lean Management hin zu Lean Construction. In Lean Construction – Das Managementhandbuch – Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen. Berlin: Springer Gabler 2018.

[12] Geberit: Modulares Bauen schafft Vorteile im Bauprozess. In IKZ 2023/Ausgabe 16. www.ikz.de/medien/ikz-haustechnik/heftarchiv/jahrgang-2023/ausgabe-16/news/detail/modulares-bauen-schafft-vorteile-im-bauprozess/, abgerufen am 10.3.2024.

[13] Wolisz H.: Bauen nach dem Lego Prinzip. In Deutsche BauZeitschrift 12/2023. www.dbz.de/artikel/bauen-nach-dem-lego-prinzip-4043814.html, abgerufen am 10.3.2024.

[14] ÖNORM H 5411 Sanitäre Einrichtungsgegenstände. Planung und Ausführung. Wien: Austrian Standards Institute 2021.

[15] TRVB 110 B Brandschutztechnische Anforderungen bei Leitungen und deren Durchführungen. Österreichischer Bundesfeuerwehrverband 2015.

[16] ÖNORM H 5155 Wärmedämmung von Rohrleitungen und Komponenten in haustechnischen Anlagen. Wien: Austrian Standards Institute 2013.

Einfacher Holzbau dank smarter Energietechnik

Michael Schär
schaerholzbau ag
Altbüron, Schweiz



Einfacher Holzbau dank smarter Haustechnik

Es gehört zur Unternehmensphilosophie von schaerholzbau, Bestehendes zu hinterfragen und auf innovative Lösungen zu setzen. Das neuste Beispiel ist die Klimatechnologie. Mit dem Klimakonvektor und der Verbundlüftung bietet schaerholzbau eine smarte wie energetisch nachhaltige Lösung, um Gebäude mit möglichst wenig Energieaufwand zu heizen, zu kühlen und zu lüften.
Moderne Bauten benötigen im Vergleich zu den Gebäuden der 1960er-Jahre nur noch 10 bis 20% der Heizenergie. Die gängigen Heizkonzepte haben sich diese Entwicklung noch kaum zunutze gemacht. Beim heutigen Dämmstandard ist nicht nur die innere Oberfläche der Wände und Gläser deutlich wärmer. Auch die Wärmespeicherkapazität der Gebäudemasse ist klar höher als die Wärmeverluste durch die Bauteile. Deshalb ist heute eine geringere Heizleistung erforderlich, die erst noch sehr rasch zu- oder weggeschaltet werden kann. Genau dies ermöglicht der Klimakonvektor von schaerholzbau.

1. Der Klimakonvektor

Wenn es um das Thema Heizen und Kühlen geht, hat schaerholzbau mit dem Klimakonvektor eine einfache und nachhaltige Lösung zur Hand. Sie sorgt mit minimalem Energiebedarf in jeder Jahreszeit für ein behagliches Raumklima. In Kombination mit einer Wärmepumpe, die heizen und kühlen kann, ist das Klimakonvektor-System sowohl bezüglich der Energiebilanz als auch der Wirtschaftlichkeit interessant. Ganz nach dem Credo – so wenig Energie wie nötig, so viel Komfort wie möglich.

1 **Klimakonvektoren** erwärmen oder kühlen die Luft und verteilen sie – ohne spürbare Zugluft – gleichmässig im Raum.

2 Kombiniert mit einer **Wärmepumpe,** die das Wasser auf 21 Grad zum Kühlen bringt und auf gerade einmal 26 Grad zum Heizen erwärmt, ergibt sich ein höchst effizientes Heiz- und Kühlsystem.

3 Die Klimakonvektoren werden einfach an den **Heizkreislauf** sowie an den **Strom** angeschlossen. Mehr Installationen sind nicht nötig.

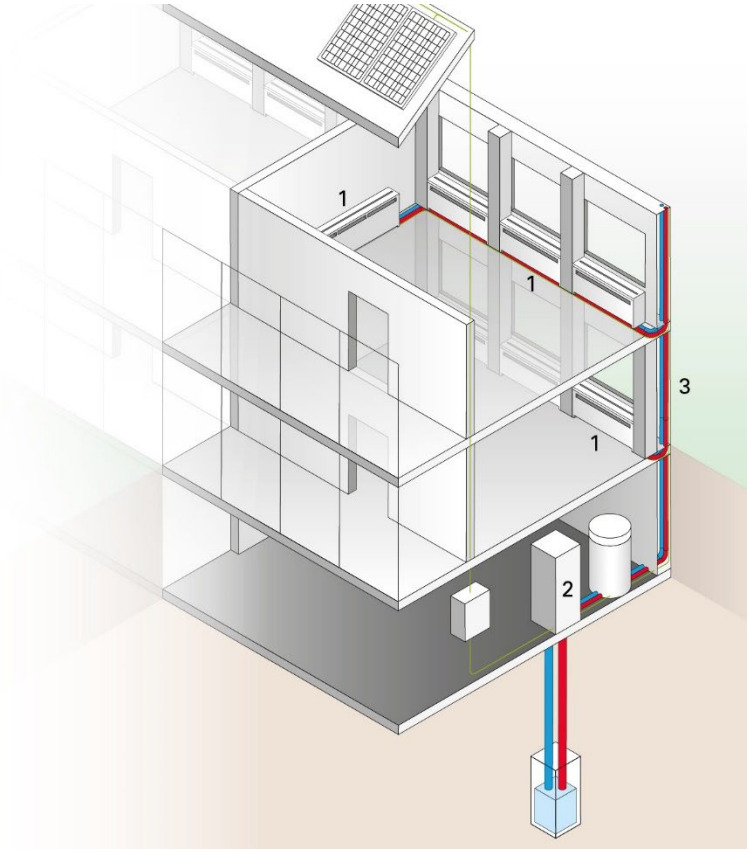


Abbildung 1: Systemübersicht Klimakonvektoren

Ein herkömmliches Heizsystem kann heizen. Um Räume zu kühlen, ist ein zusätzliches System erforderlich. Der Klimakonvektor bietet beides aus einer Hand: Er gleicht Temperaturdifferenzen sehr schnell aus und ermöglicht das ganze Jahr hindurch eine auf die Jahreszeit abgestimmte und angenehme Raumtemperatur. Der technische Aufwand ist minimal, die Bedienung ist einfach, die Lebensdauer ist lang. Das System arbeitet lautlos, es gibt keine Zugluft. Der Einbau ist sowohl in bestehenden Gebäuden als auch bei Neubauten unkompliziert.

Bei einem herkömmlichen Konvektionsheizkörper mit Vorlauftemperaturen über 40°C streicht die Luft entlang des Heizkörpers und steigt dann auf. Im Gegensatz dazu saugen beim Klimakonvektor von schaerholzbau kleine, im Gehäuse verbaute Ventilatoren die Luft durch den Wärmetauscher. Dadurch kann das System mit viel geringeren Temperaturdifferenzen arbeiten und viel schneller reagieren. Die Vorlauftemperatur zum Heizen liegt bei 26°C und beim Kühlen bei 21°C. Das hat zur Folge, dass die Wärmepumpe eine viel höhere Leistungszahl COP erzielt als bei allen anderen Systemen. Ausserdem müssen die Leitungen nicht gedämmt werden, da durch die geringe Differenz zur Raumtemperatur wenig Verluste entstehen. Und eine Kondensatbildung an den Leitungen beim Kühlen gibt es bei 21°C ebenfalls nicht, daher braucht es auch keine Kondensatabläufe.

Der Klimakonvektor ist besonders prädestiniert für Büros und Schulen. Dort ändern sich die internen Lasten (jede Person gibt sitzend 60-120W an Wärme ab) sehr kurzfristig. Bei Gebäuden mit Bodenheizung führt das schnell zu Überhitzung, da die Bodenheizung sehr träge reagiert. Ein modernes Schulhaus oder Bürogebäude kann tagsüber durch die internen Lasten (Nutzer, Elektronik, etc.) beheizt werden. Der Klimakonvektor hingegen schaltet sofort ab und verschwendet keine Energie.

Der Konvektor kann optimal bei Brüstungen oder in Schrankfronten eingebaut werden und bleibt bis auf ein paar Schlitze unsichtbar. Gerade bei Holzbauten sind die Gestaltungsmöglichkeiten zahlreich, um den Klimakonvektor in das Raumdesign zu integrieren. Die Geräte können nach den Wünschen des Architekten und der Bauherren für jedes Gebäude individuell geplant werden.

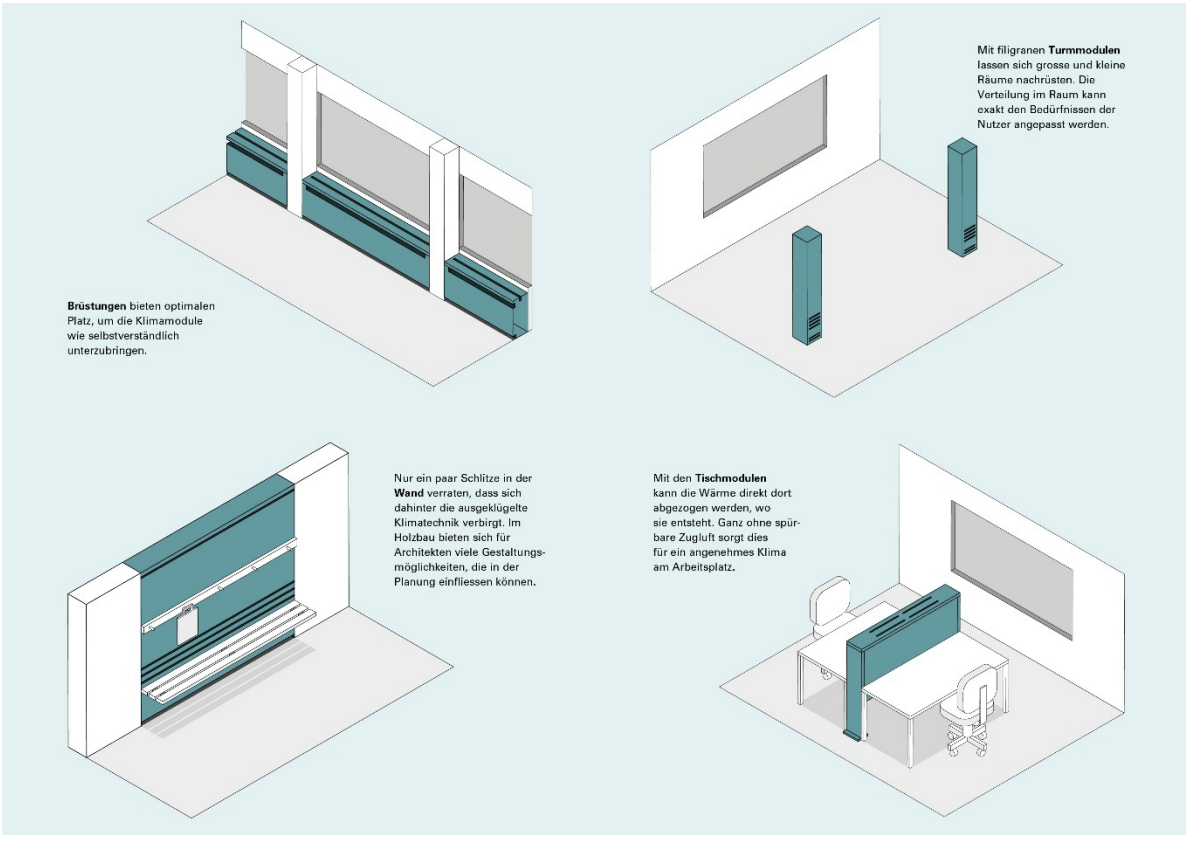


Abbildung 2: Mögliche Bauformen von Klimakonvektoren

Das System ist auch Regelungstechnisch sehr einfach aufgebaut. Der Volumenstrom des Vorlaufs ist Sommer und Winter konstant, ohne Ventile oder dergleichen. Der im Gerät eingebaute Thermostat schaltet lediglich die Ventilatoren ein und aus. Eine übergeordnete Steuerung regelt die Wärmepumpe und kann je nach Aussentemperatur die Thermostate übersteuern.

Eine weitere Besonderheit ist, dass die ganzjährige Kühlung von Serverräumen einfach ins System eingebunden werden kann. So wird die Abwärme der Server im Winter zum Heizen genutzt. Dies erhöht die Energieeffizienz des Gebäudes zusätzlich.

Werden die Klimakonvektoren an eine Erdsonden-Wärmepumpe angeschlossen, kann die Kühlung über sogenanntes «Free Cooling» betrieben werden. Das bedeutet, dass zur Kühlung nur die Umwälzpumpe der Sole läuft, nicht aber der Kompressor. So ist der Energieaufwand für die Kühlung minimal und die Erdsonde wird im Sommer regeneriert.

2. Die Verbundlüftung

Die Verbundlüftung beruht auf der Erfahrung, dass sich die frische Luft in Gebäudebereichen mit mehreren Räumen gut verteilt, wenn die Türen offen stehen. So wird ein zentraler Raum der Nutzungseinheit als «Lunge» genutzt. Bei geschlossenen Türen werden die angrenzenden Räume über Verbundlüfter mit frischer Luft versorgt. Im aktiven Teil des Verbundlüfters fördern kleine Ventilatoren verbrauchte Luft vom Raum in den Korridor. Im passiven Teil strömt frische Luft vom Korridor in den Raum zurück. Diese Verbundlüfter können in Türen eingebaut, oder als separate Elemente in die Innenwand integriert werden.

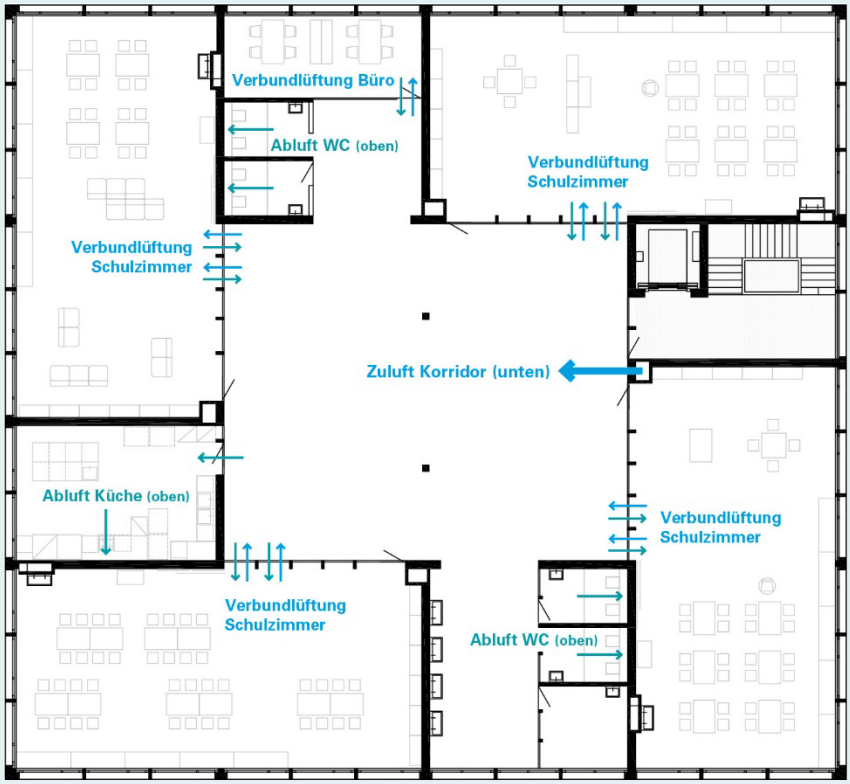


Abbildung 3: Konzept der Verbundlüftung

Bei konventionellen Lüftungsanlagen wird jeder Raum, egal ob jemand anwesend ist oder nicht, über separate Kanäle mit Frischluft versorgt. Das führt zu einem unnötig hohen Luftwechsel pro Nutzungseinheit, da sich die Nutzer innerhalb der Nutzungseinheit bewegen, aber für alle Räume der Luftwechsel für die maximale Belegung ausgelegt wird.
Bei der Verbundlüftung wird nur die «Lunge» über einen Quellauslass vom Monoblock mit Frischluft versorgt. Die Luftmenge wird dabei über CO_2-Sensoren in der Abluft reguliert.

Alle angrenzenden Räume werden durch die Verbundlüfter versorgt. Diese werden einfach über Türkontakte oder Präsenzmelder ein- und ausgeschaltet. Die verbrauchte Luft steigt in den Räumen an die Decke und wird durch den Verbundlüfter zurück in den Korridor geführt. An der Decke im Korridor oder in den WC-Anlagen wird sie dann vom Monoblock mit integrierter Wärmerückgewinnung abgesaugt.

Die Lüftungsanlage wird auf die Belegung der gesamten Nutzungseinheit ausgelegt und nicht auf die Summe der maximalen Belegung der einzelnen Räume. Dadurch werden die Investitionskosten reduziert (kleinere Lüftungsanlage), die Steigzonen benötigen weniger Platz und die Luft wird im Winter wegen der tieferen Luftwechselrate weniger ausgetrocknet. Im Betrieb sind die Lüftungsverluste geringer und der Stromverbrauch der Lüftung ebenso.

Für den Holzbau hat die Verbundlüftung den grossen Vorteil, dass es keine horizontale Lüftungsrohre in den Decken gibt. Vertikale Schächte und der Einbau von Verbundlüftern in Innenwänden oder Türen können sehr einfach realisiert werden.

3. Die Kombination

Klimakonvektoren und Verbundlüfter ergänzen sich hervorragend und werden daher oft im Zusammenspiel eingesetzt. Sie können aber entsprechende den Anforderungen auch separat verbaut werden.

In Wohnungen, die nur mit einem zentralen Konvektor ausgerüstet sind, sorgen die Verbundlüfter ebenfalls für die Wärmeverteilung in die Zimmer. Ein Beispiel dafür ist das MFH neuRaum in Horw, das 2022 mit dem Watt d'Or des Bundesamts für Energie ausgezeichnet wurde.

Auch beim Neubau des «Haus des Holzes» der Pirmin Jung AG in Sursee sind Brüstungskonvektoren und Wandverbundlüfter eingebaut worden. Mit der Verkleidung in Weisstannen integrieren sie sich nahtlos ins Gebäude und sorgen ganzjährig für ein angenehmes und produktives Büroklima.



Abbildung 4: Klimakonvektor (links) und Wand-Verbundlüfter (rechts) in Weisstanne beim Haus des Holzes
Copyright: PIRMIN JUNG Schweiz AG, Fotografie: MARCOLEU

GEBÄUDE – technik | bauteile | materialien
Raumlüftung

Wand-Pendellüfter – Möglichkeiten und Grenzen bei Schall, Feuchte und Energieeinsparung

Dr. Jan Krüger
Hochschule für Technik
Acoustic Innovation Consulting (AIC)
Stuttgart, Deutschland



Wand-Pendellüfter – Möglichkeiten und Grenzen bei Schall, Feuchte und Energieeinsparung

1. Einleitung

Durch die traditionelle Wohnraumlüftung über manuelles Öffnen von Fenstern kommt es zu erheblichen Wärmeverlusten in Gebäuden. Gleichzeitig können durch offene Fenster Lärm, Ungeziefer und insbesondere in Erdgeschosswohnungen auch Einbrecher eindringen. Eine automatische Lüftung stellt daher einen wesentlichen Gewinn an Komfort und Sicherheit dar und kann nicht zuletzt auch zur Energieeinsparung und damit zur Verbesserung der Klimabilanz beitragen. Während zentrale Lüftungsanlagen recht aufwändig sind und sich weniger für die Sanierung im Bestand eignen, stellen dezentrale Wandlüfter mit Wärmerückgewinnung (sogenannte Pendellüfter) eine mögliche Alternative dar. Mit dem kompakten Wandeinbau ergeben sich jedoch akustische Herausforderungen für die Schalldämmung der Fassade und den durch den eingebauten Ventilator selbst erzeugten Lärm. Für diese Studie wurden aktuell handelsübliche Wandlüfter hinsichtlich ihrer Akustik untersucht und mit den normativen Anforderungen verglichen. Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede bei den gemessenen Norm-Schallpegeldifferenzen und Schallleistungspegeln. Zusätzlich wurden Aspekte des Feuchteschutzes und der möglichen Energieeinsparung an zwei Beispielen betrachtet und rechnerisch quantifiziert.

2. Aufbau und Funktion von Wandlüftern mit Wärmerückgewinnung

Dezentrale Wandlüfter werden schon länger in Gebäuden benutzt, insbesondere im Bad und in der Küche um hohe temporäre Spitzenlasten an Feuchte und Geruchsbelästigung schnell abzubauen. Hierbei wird häufig eine höhere Lärmbelastung akzeptiert, da sie nur zeitlich begrenzt auftritt. Im Gegensatz dazu sind moderne Wandlüfter mit Wärmerückgewinnung (WRG) für den dauerhaften Betrieb in Wohn- und Schlafräumen entwickelt, um dort die Feuchtebelastung zu reduzieren und kontinuierlich für frische Luft zu sorgen.

Der Aufbau verschiedener am Markt erhältlicher Wandlüfter ähnelt sich prinzipiell und ist in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt. Durch die besondere Eigenschaft des reversiblen Betriebs des Axial-Ventilators kann in einer ersten Phase z.B. warme, verbrauchte Luft aus dem Innenraum nach außen gedrückt werden, was den zur Außenseite hin angeordneten Speicherstein «thermisch auflädt». In einer 2. Phase wird die Strömungsrichtung umgekehrt und kalte Außenluft angesaugt und durch den warmen Stein gezogen. Dabei wärmt sich die Außenluft auf und kühlt den Speicherstein wieder ab. Dieser Prozess wiederholt sich ständig mit einer Periodendauer von ca. 2 Minuten. Somit wird die Luft durch einen pendelnden Prozess stetig getauscht, was im Gegensatz zu dezentralen Lüftungsgeräten mit aufwändigen Kreuzwärmetauschern einen recht kompakten Aufbau ermöglicht.

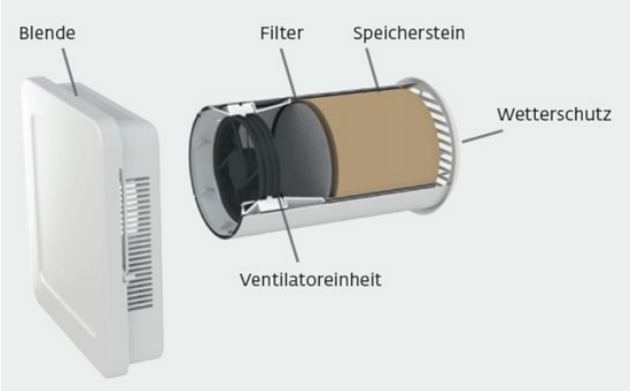


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Wandlüfters mit Wärmerückgewinnung (Quelle: www.siegenia.com)

Bei einer manuellen Wohnraumlüftung durch Öffnen oder Ankippen von Fenstern sinkt die Schalldämmung (temporär) sehr stark ab [1] und der Außenlärm kann fast ungehindert eindringen. Für Anwohner von verkehrsreichen Straßen ist dadurch eine entspannende Freizeit innerhalb der Wohnung behindert und ein erholsamer Nachtschlaf kaum möglich. Für Bewohner von Erdgeschoss-Wohnungen stehen auch Sicherheitsaspekte einer insbesondere nachts unbeaufsichtigten Lüftung durch gekippte Fenster entgegen. Dies macht Wand-Pendellüfter neben den positiven Effekten der Energieeinsparung besonders für Wohnungen im Erdgeschoss attraktiv.

Auf Grund ihrer bauphysikalischen Bedeutung wurden Wandlüfter mit WRG am Zentrum für Bauphysik der Hochschule für Technik bereits im Rahmen von anderen Forschungsprojekten untersucht [2–5]. Dabei wurde an einzelnen Geräten jedoch festgestellt, dass die akustischen Eigenschaften nur bei geringer Lüftungsleistung einen hinreichenden Komfort erreichen. Da inzwischen einige Hersteller am Markt tätig sind, die die Technologie weiterentwickelt haben, wurden im laufenden Projekt «Schallschutz im Erdgeschoss» [6] insgesamt 4 Modelle von verschiedenen Herstellern aus dem deutschsprachigen Raum u.a. im Rahmen einer Bachelorarbeit [7] untersucht. Die Lüftungsgeräte wurden von den Herstellern dankenswerter Weise kostenfrei zur Verfügung gestellt.

3. Messaufbau und untersuchte Geräte

Die untersuchten Geräte ähneln sich in ihrem grundsätzlichen Aufbau, d.h. in einem Rohr mit einem Durchmesser von ca. 160 – 200 mm sind alle wesentlichen Komponenten untergebracht. Dieses Rohr wird in eine kreisrunde Öffnung in die Fassade eingebracht und außen mit einer Wetterschutzblende und innen mit einer Designblende abgeschlossen. Dabei variieren die Geräte in ihren Bedienkonzepten (Schalter oder/und App) sowie im optischen Design der sichtbaren Teile. Eine Übersicht mit einer farbkodierten Modellbezeichnung zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Wandlüfter

	Wandlüfter Modell			
	A	**B**	**C**	**D**
Min. Außenluftvolumenstrom $q_{V,min}$ / m³/h	15	14	15	16
Max. Außenluftvolumenstrom $q_{V,max}$ / m³/h	45	45	42	55
Wärmebereitstellungsgrad η_{WRG} / %	72	75	82	80

Die akustischen Eigenschaften wurden in einem Aufbau im Fenster-Prüfstand des Zentrums für Bauphysik bestimmt. Hierbei wurde der Fensterausschnitt mit einer relativ gut schalldämmenden doppelschaligen Leichtbauwand mit ca. 410 mm Dicke ausgekleidet (Abbildung 2). An diesem Wandaufbau wurde ohne Lüfter eine Norm-Schallpegeldifferenz $D_{n,e,w}$ von 74 dB (-5, -13) nach [8, 9] bestimmt, was deutlich über den zu erwartenden Norm-Schallpegeldifferenzen der Lüfter liegt, wodurch eine genaue Vermessung dieser erst ermöglicht wird.



Abbildung 2: Aufbau eines Wandlüfters im Fenster-Prüfstand

Die Messung der abgestrahlten Schallleistung L_{WA} erfolgte im gleichen Prüfstand nach [10] mit einer Vergleichsschallquelle, die in der Nähe der Innenblende aufgestellt war.

4. Messergebnisse der Norm-Schallpegeldifferenz

Die Ergebnisse der Messungen an den 4 Geräten mit offenen Lüftungsklappen sowie der geschlossenen Leichtbauwand sind in Abbildung 3 dargestellt. Während alle Lüfter die Norm-Schallpegeldifferenzen der vollständig geschlossenen Leichtbauwand bei tiefen Frequenzen kaum verschlechtern, ist dies bei hohen Frequenzen stärker der Fall. Grundsätzlich ist die Schalldämmung ab ca. 1000 Hz für die Praxis aber ausreichend hoch und hat kaum Einfluss auf den Einzahlwert der bewerteten Norm-Schallpegeldifferenzen $D_{n,e,w}$, der in Tabelle 2 aufgeführt ist. Dieser Einzahlwert wird bei allen Geräten im Wesentlichen durch den Einbruch um 400 Hz bestimmt.

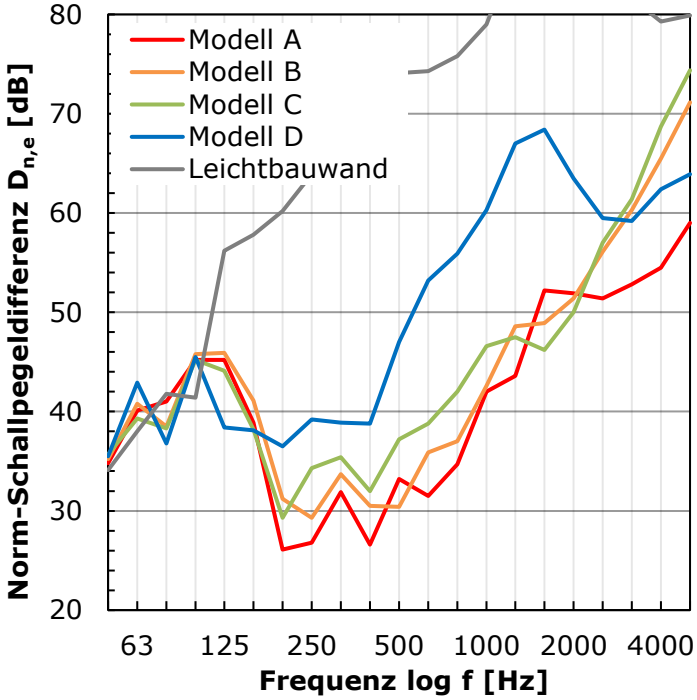


Abbildung 3: Gemessene Norm-Schallpegeldifferenzen $D_{n,e}$

Die erreichten Einzahlwerte der bewerteten Norm-Schallpegeldifferenzen variieren erheblich und liegen zwischen 37 und 51 dB und damit in einem Bereich, der auch für übliche Fenster ab einer Schallschutzklasse 3 typisch ist [11].

Tabelle 2: Norm-Schallpegeldifferenzen $D_{n,e,w}$ der untersuchten offenen Wandlüfter (Einzahlwerte)

	Wandlüfter Modell			
	A	B	C	D
$D_{n,e,w}$ in dB	37	40	43	51

5. Messergebnisse der Schallleistung

Die Ergebnisse der gemessenen Schallleistung L_{WA} in der jeweils maximalen Lüftungsstufe sind für den etwas lauteren Fall «Zuluft» in Abbildung 4 spektral dargestellt und zeigen Maxima im Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 500 Hz. Frequenzen unter 160 Hz und über 1600 Hz spielen eine untergeordnete Rolle und dürften in der Praxis kaum stören. Abgesehen von Modell A ist keine hohe Tonalität festzustellen. Zur besseren Einordnung sind in Tabelle 3 die Einzahlwerte für die minimale und maximale Lüfterstufe während der Zuluft- und Abluftphase getrennt aufgeführt. Grundsätzlich ist der Zuluftbetrieb stets etwas lauter als der Abluftbetrieb, was durch die erhöhte Schallausbreitung in Strömungsrichtung physikalisch nachvollziehbar ist.

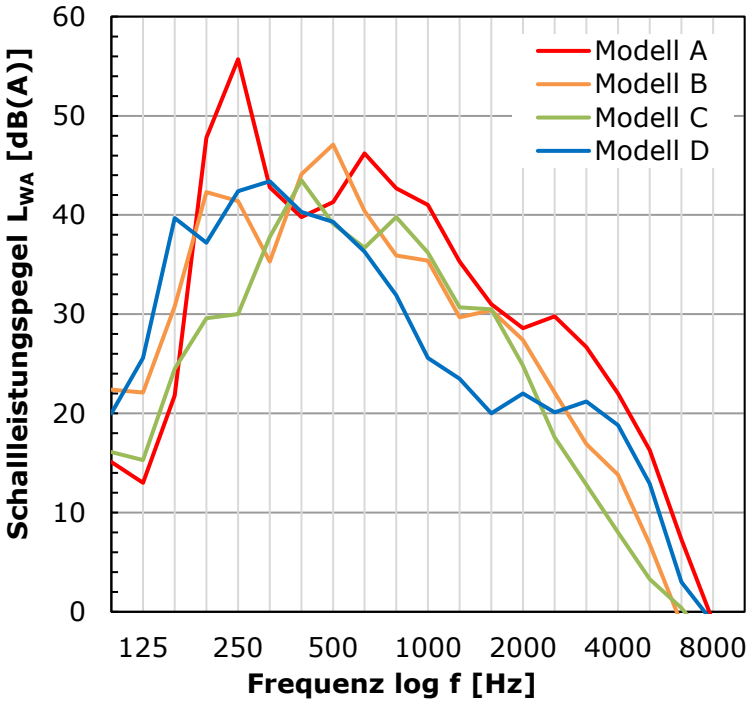


Abbildung 4: Gemessene Schallleistungspegel L_{WA} (Zuluftbetrieb) in maximaler Lüftungsstufe

Tabelle 3: Gemessene Schallleistungspegel L_{WA} der untersuchten Wandlüfter (Einzahlwerte) in minimaler und maximaler Lüftungsstufe

L_{WA} in dB(A)	Wandlüfter Modell			
	A	B	C	D
Min. Zuluft	32,2	28,4	28,1	23,7
Min. Abluft	31,6	26,2	30,1	25,8
Max. Zuluft	57,4	51,3	47,8	49,1
Max. Abluft	52,5	47,3	46,6	46,6

6. Vergleich mit normativen Anforderungen und Bedeutung für die bauakustische Praxis

Die baurechtlich eingeführten Mindestanforderungen an bauakustische Kenngrößen sind in Deutschland in [12] definiert. Erhöhte Anforderungen wie sie z.B. in [13] beschrieben werden, sind zwar baurechtlich nicht eingeführt, jedoch juristisch weitgehend als anerkannte Regeln der Technik akzeptiert und werden im Bereich von «Komfort-Wohnungen» auch erwartet. Darüber hinaus existiert eine Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Akustik e.V. mit ihrem in der Fachwelt renommierten Fachausschuss «Bau- und Raumakustik». Für den effektiven Schutz der Menschen vor Lärm ist der im Gebäude auftretende Schalldruckpegel L_i von entscheidender Bedeutung [6, 14, 15]. Dieser Schalldruckpegel wird bei der Anregung durch Verkehrslärm aus dem maßgeblichen Außenlärmpegel L_a sowie der resultierenden Schalldämmung der Fassade $R'_{w,ges}$ abgeleitet. Um die Lärmbelastung der Bewohnerinnen und Bewohner zu begrenzen, wird in [12] daher indirekt die nötige Fassadendämmung einfach in Abhängigkeit vom maßgeblichen Außenlärmpegel L_a und der Art der Räume $K_{Raumart}$ vorgeschrieben.

$$R'_{w,ges} = L_a - K_{Raumart} \quad (1)$$

Daraus ergibt sich zwangsläufig, dass für eine bestehende Fassade, die für eine bestimmte Verkehrslärmsituation ausgelegt wurde, jegliches zusätzliches in die Fassade eingebrachte Element, die resultierende Schalldämmung nicht wesentlich absenken sollte. Diese Verschlechterung hängt selbstverständlich von der Fläche der Fassade (hier z.B. 7,5 m²) und der bereits vorhandenen Fassaden-Schalldämmung $R'_{w,ges,oL}$ (ohne Lüfter) und von der Norm-Schallpegeldifferenz des Wandlüfters ab, was in Abbildung 5 grafisch dargestellt ist. Wenn man annimmt, dass eine Verschlechterung der Fassaden-Schalldämmung von < 2 dB gerade noch akzeptabel wäre, verdeutlicht die Grafik, dass damit die meisten der hier untersuchten Wandlüfter nur bei weniger akustisch anspruchsvollen Fassaden eingesetzt werden können. Hingegen wäre für eine Wohnung in einem höher verkehrslärmbelasteten Gebiet im Lärmpegelbereich V mit L_a = 75 dB, für die eine Fassade mindestens ein resultierendes Schalldämm-Maß von 45 dB haben sollte, nur das Modell D geeignet. Diese Betrachtung geht vereinfachend von Einzahlwerten aus. Eine genauere Analyse sollte den Spektrums-Anpassungswert für Verkehr C_{tr} mit einbeziehen [16] oder noch besser alle Spektralwerte separat betrachten.

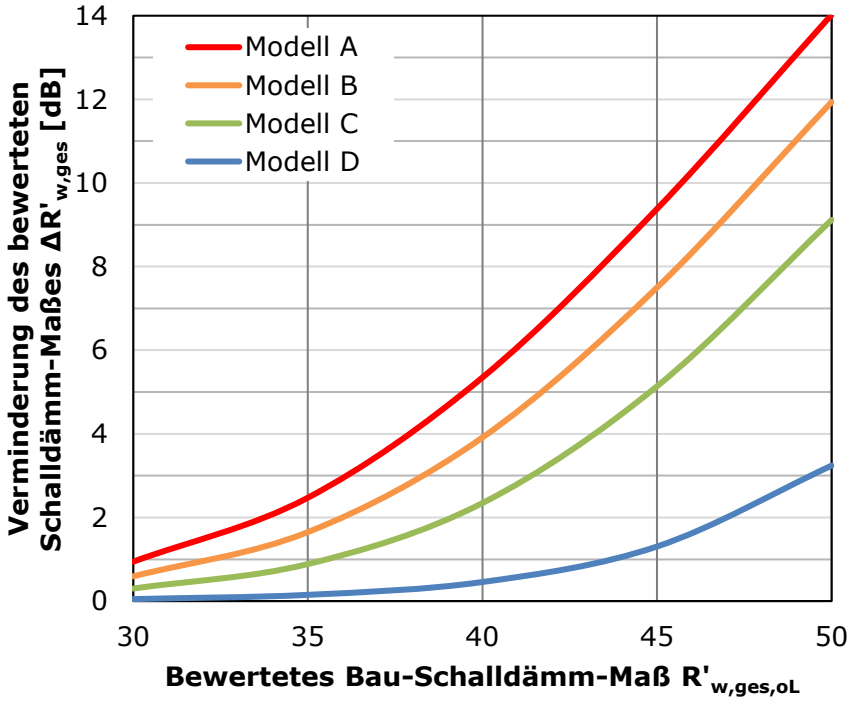


Abbildung 5: Verschlechterung des bewerteten Schalldämm-Maßes $\Delta R'_{w,ges}$ in Abhängigkeit des Schalldämm-Maßes der Außenwand mit einer Fassadenfläche von 7,5 m² ohne Lüfter

Der gemittelte Innen-Schalldruckpegel L_i bzw. nach [12] der maximal zulässige A-bewertete Schalldruckpegel $L_{AF,max,n}$ ist auch für die Bewertung der Schallemission des Lüftungsgerätes während des Betriebes die maßgebliche Größe. Er muss jedoch aus dem im Labor nach Norm und gut reproduzierbar gemessenen Schallleistungspegel L_{WA} abgeleitet werden. Hierzu könnte man vereinfachend im Empfangsraum bzw. dem zu schützenden Raum von einem idealen Diffusfeld (keine Absorption) oder einem idealen Freifeld (maximale Absorption) ausgehen, was in einem realen Raum mit Möblierung aber beides nicht zutrifft. Setzt man jedoch realistischerweise zur Ermittlung des Schalldruckpegels $L_{AF,n}$ ungefähr eine zu berücksichtigende äquivalente Absorptionsfläche im Diffusfeld des Raumes von A = 10 m² an, ergibt sich für die A-bewerteten Einzahlwerte folgender einfacher Zusammenhang [4]:

$$L_{AF,n} = L_{WA} - 4{,}0\ dB(A) \tag{2}$$

Da bei allen untersuchten Geräten keine ausgeprägten temporären Spitzen im Schalldruckverlauf vorlagen, kann man weiterhin davon ausgehen, dass $L_{AF,max,n} \approx L_{AF,n}$ ist. Die sich aus den genannten Quellen damit ergebenden Anforderungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Anforderungen an den Innen-Schalldruckpegel $L_{A,F,max,n}$ in Wohngebäuden

Vorschrift $L_{AF,max,n}$	**Anforderung in dB(A)**
DIN 4109-1 «Mindestanforderung»	≤ 35
DIN 4109-5 «bei Dauergeräuschen nachts»	≤ 30
DEGA 104 EW3 «hohe Zufriedenheit»	≤ 25

Berechnet man nun aus der gemessenen Schallleistung L_{WA} über die einfache Gleichung (2) die $L_{AF,max,n}$ der Geräte in den verschiedenen Betriebszuständen (Tabelle 5), so wird klar, dass in der höchsten Lüftungsstufe kein Gerät die Mindestanforderung einhält. In der kleinsten Lüftungsstufe hingegen ist für alle Geräte zumindest nachts ein Dauerbetrieb erträglich und für Modell B und D kann sogar von einer hohen akustischen Zufriedenheit ausgegangen werden.

Tabelle 5: Berechnete Schalldruckpegel $L_{A,F,max,n}$ der getesteten Wandlüfter (Einzahlwerte)

$L_{AF,max,n}$ in dB(A)	**Wandlüfter Modell**			
	A	**B**	**C**	**D**
Min. Zuluft	28,2	24,4	24,1	19,7
Min. Abluft	27,6	22,2	26,1	21,8
Max. Zuluft	53,4	47,3	43,8	45,1
Max. Abluft	48,5	43,3	42,6	42,6

7. Lüftung und Feuchteschutz

Für die Gesundheit und Lebensqualität der in den Gebäuden wohnenden Menschen sowie zur Regulierung der Luftfeuchtigkeit muss ein regelmäßiger Luftaustausch mit Frischluft aus dem Außenbereich sichergestellt werden. Der Umfang der nötigen Lüftung hängt von vielen Parametern wie z.B. der Wohnfläche und Anzahl der Bewohner sowie ihren Aktivitäten ab und ist in Deutschland in [17] näher beschrieben bzw. genormt. Die Norm unterscheidet hier grundsätzlich zwischen folgenden Lüftungsarten:

- **Lüftung zum Feuchteschutz** => notwendige Lüftung zur Sicherstellung des Bautenschutzes (Feuchte) bei zeitweiliger Abwesenheit der Nutzer und kein Wäschetrocknen
- **Reduzierte Lüftung** => notwendige Lüftung zur Sicherstellung der gesundheitlichen Mindestanforderungen sowie des Bautenschutzes (Feuchte) bei reduzierter Anwesenheit der Nutzer oder geringerer Raumluftqualität

- **Nennlüftung** => notwendige Lüftung zur Sicherstellung der gesundheitlichen Anforderungen sowie des Bautenschutzes bei Anwesenheit aller Nutzer (Normalbetrieb)
- **Intensivlüftung** => zeitweilige Lüftung mit erhöhtem Luftvolumenstrom zum Abbau von Lastspitzen (Lastbetrieb)

Der nötige Luftaustausch geschieht in jedem Gebäude teilweise durch Infiltration infolge geplanter und ungeplanter Undichtigkeiten der Gebäudehülle. Dies reicht normalerweise aber nicht aus und es muss zusätzlich ein Luftaustausch über die traditionelle Fensterlüftung durch die Bewohner manuell oder durch ventilatorgestützte Geräte (mechanisch) mehr oder weniger automatisch erfolgen. Da die Infiltration oft nur grob abgeschätzt werden kann, ist in [17] auch eine Formel (3) gegeben, wie bei Wohngebäuden bzw. Wohnungen (Nutzungseinheiten NE) der nötige gesamte Nennluftvolumenstrom $q_{V,ges,NE,NL}$ in Abhängigkeit der Fläche der Nutzungseinheit A_{NE} berechnet werden kann:

$$q_{V,ges,NE,NL} = -0{,}002\,A_{NE}^2 + 1{,}15A_{NE} + 11 \quad (3)$$

Beispielhaft wurde dies in [7] für eine 3-Zimmer-Wohnung (Abbildung 6) sowie in [18] bei einem modernen freistehenden Einfamilienhaus mit 2 Geschossen näher betrachtet. Tabelle 6 enthält die Daten und Ergebnisse der Berechnungen der verschiedenen Luftvolumenströme.

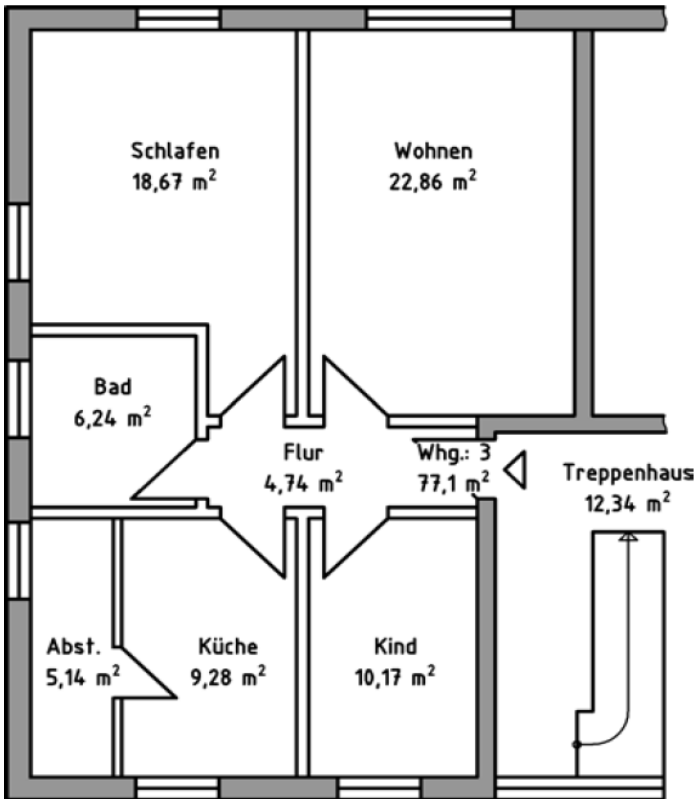


Abbildung 6: Grundriss einer beispielhaften 3-Zimmer-Wohnung mit 77 m² Wohnfläche nach GEG

Tabelle 6: Berechnete Lüftungsdaten von 2 unterschiedlichen neu erstellten Gebäuden nach GEG 2020

	Berechnung nach [17] - Gleichung (8)	
	3-Zimmer-Wohnung in Mehrfamilienhaus	**Freistehendes Einfamilienhaus**
Wohnfläche A_{NE} [m²]	77	214
Luftvolumenstrom zum Feuchteschutz $q_{V,ges,NE,FL}$ [m³/h]	26	33
Luftvolumenstrom für reduzierte Lüftung $q_{V,ges,NE,RL}$ [m³/h]	61	116
Luftvolumenstrom für Nennlüftung $q_{V,ges,NE,NL}$ [m³/h]	88	166

Die in Tabelle 1 angegebene Außenluftvolumenströme werden auf Grund der Pendeltaktrate nur in ca. 50% der Zeit realisiert. Damit ergibt sich, dass mit maximalem Außenluftvolumenstrom mindestens 1 – 2 Geräte zum Einsatz kommen müssten, um den Feuchteschutz sicherzustellen. Dies hätte jedoch einen kaum akzeptablen Lärm der ständig unter Volllast laufenden Wandlüfter zur Folge. Weiterhin stellt sich auch das Problem der Positionierung der Wandlüfter und gleichmäßigen Verteilung der Frischluft in der Nutzungseinheit. Da aber zusätzlich noch beachten werden muss, dass nach [17] eine Luftwechselrate von 15 m^3/ h pro Person in Schlafräumen oder Kinderzimmern nicht unterschritten werden sollte, resultiert daraus, dass sinnvollerweise mindestens ein Wandlüfter pro bewohntem Zimmer sowie auch in Küche und Bad nötig sind. Strenggenommen reicht aber selbst der Wandlüfter Modell D mit dem höchsten Außenluftvolumenstrom im Schlafzimmer nicht aus, um für 2 Personen, die nötigen 30 m^3/h sicherzustellen. Geht man jedoch davon aus, dass durch zumindest zeitweise geöffnete Türen ein effektiver Luftaustausch innerhalb der Wohneinheit stattfindet, so kann immerhin ein Feuchteschutz nach [17] sicher erreicht werden. Je nach Belegung und zeitweiser Abwesenheit der Bewohnerinnen und Bewohner dürfte sogar eine reduzierte Lüftung möglich sein. Die Bewohnerinnen und Bewohner müssten jedoch darüber informiert werden, dass trotz der betriebenen Wandlüfter insbesondere für eine Intensivlüftung weiterhin die Fenster genutzt werden sollen. Nicht zuletzt kann zudem durch eine programmierbare zeitliche Steuerung der Wandlüfter z.B. in einem Schlafzimmer (niedrigste Stufe in der Nacht und höchste Stufe bei Abwesenheit tagsüber) ein akustischer Komfort mit den Vorteilen einer automatischen Lüftung verbunden werden.

8. Energieeinsparung durch Lüftung mit Wärmerückgewinnung

Um die mögliche Energieeinsparung durch die Reduzierung der Lüftungswärmeverluste zu quantifizieren, sollen die in Kapitel 7 betrachteten unterschiedlichen Nutzungseinheiten (NE) nun näher betrachtet werden. Für die nach GEG 2020 [19] berechneten NE wurden in Tabelle 6 wesentliche Kenndaten für eine angenommene manuelle Fensterlüftung gegenüber gestellt. Die real auch auftretenden solaren Wärmegewinne wurden der Einfachheit halber vernachlässigt, da sie sich nicht wesentlich auf das Verhältnis der Wärmeverluste von Lüftung zu Transmission auswirken.

Tabelle 7: Berechnete Daten von 2 unterschiedlichen neu erstellten Gebäuden nach Gebäude-Energiegesetz

	Berechnung mit Nennlüftung über Fenster	
	3-Zimmer-Wohnung in Mehrfamilienhaus	**Freistehendes Einfamilienhaus**
Wohnfläche A [m^2]	77	214
Transmissionswärmeverlust Q_T [kWh/a]	2.480	11.053
Lüftungswärmeverlust Q_V [kWh/a]	1.755	8.577
Flächenbezogener jährlicher Lüftungswärmeverlust [kWh/m^2a]	23	40
Anteil des Lüftungswärmeverlusts am gesamten Wärmeverlust [%]	41	44
Potential zur Reduzierung der Gesamt-Wärmeverluste bei Einsatz einer mechanischen Lüftung mit $\eta_{WRG} \approx 75$ %	31	33

In beiden betrachteten NE erreicht der Anteil der Nenn-Lüftungswärmeverluste zwischen 40-50% an den gesamten Wärmeverlusten! Mit den untersuchten Wandlüftern wird ein Wärmebereitstellungsgrad von ca. $\eta_{WRG} \approx 75$ % selbst nach Abzug des relativ geringen eigenen Strombedarfs erreicht. Dies würde bedeuten, dass durch die mechanische Lüftung mit WRG der nötige Heiz-Energiebedarf um mindestens 33 % verringert werde könnte. In der Folge wären auch geringere Vorlauftemperaturen im Heizkreislauf nötig und kleinere Heizlasten könnten den Einsatz von Wärmepumpen ermöglichen bzw. noch effizienter machen.

Dabei muss jedoch angemerkt werden, dass die für eine Nennlüftung nötige normgerecht angesetzte Luftwechselrate von n=0,5 h^{-1} praktisch bedeutet, dass alle ca. 2 h und somit pro Tag 12 Mal vollständig durchgelüftet wird. Es ist anzunehmen, dass diese hohe Luftwechselrate mit Fensterlüftung in der Praxis kaum erreicht wird. Da nicht jeder Haushalt die Luftfeuchtigkeit oder gar den CO_2-Gehalt mit entsprechenden Messgeräten überwacht und danach lüftet, kommt es vielmehr in manchen Fällen sogar dazu, dass bei geringer Infiltration nicht einmal die nötige Luftwechselrate für den Feuchteschutz erreicht wird, die bei etwa einem Drittel der Nennlüftung liegt. So kommt es insbesondere nach Fenstersanierungen immer wieder zu Schimmelproblemen, da die Bewohnerinnen und Bewohner ihr gewohntes Lüftungsverhalten beibehalten, weil dies ja früher (bei deutlich höherer Infiltration) stets ausgereicht hatte [20, 21]. Nimmt man also an, dass in der Praxis der Fensterlüftung lediglich eine reduzierte Lüftung realisiert wird, fallen auch die potentiellen Einsparungen der Lüftungswärmeverluste durch mechanische Lüftungssysteme letztlich geringer aus. Ehrlicherweise sind sie sogar kaum noch vorhanden, wenn dann die mechanisch erhöhte Nennlüftung angesetzt wird – allerdings wäre dann die Luftqualität deutlich angehoben. Dennoch darf der Nutzen einer automatisierten mechanischen Wohnraumlüftung mit WRG für den unbedingt nötigen Feuchteschutz und auch die Energieeinsparung nicht unterschätzt werden. Nicht zuletzt kann eine automatische mechanische Lüftung ja einem Schimmelschaden durch mangelhafte Fensterlüftung wirkungsvoll vorbeugen, wie er gar nicht so selten nach einer reinen Fenstersanierung auftritt.

9. Zusammenfassung

Die Wärmeverluste durch traditionelle Fensterlüftung in modernen, gut gedämmten Wohnungen und Häusern nach GEG erreichen nahezu 50% der gesamten Wärmeverluste, wenn man die für ein optimales Raumklima nötige Nennlüftung unterstellt. Da die Bewohnerinnen und Bewohner aber meist deutlich seltener als nötig mit dem Fenster lüften (z.B. 2–3 Mal täglich Stoßlüften), wird praktisch meist auch nur ein Feuchteschutz oder die reduzierte Lüftung realisiert. Dennoch ist eine mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung unbedingt empfehlenswert und sollte mit anderen Maßnahmen wie der Erhöhung der Wärmedämmung im Sinne des ökonomischen Wirkungsgrades sorgfältig abgewogen werden. Während zentrale Lüftungsanlagen technisch komplex und nicht überall umzusetzen sind, kann mit kleinen dezentralen Lüftungsgeräten nicht nur im Neubau sondern auch in der Sanierung von Bestandsbauten die Heizlast wesentlich verringert und der Lüftungskomfort verbessert werden. Zudem gelingt zuverlässig der Schutz vor Schimmel und die Sicherheit gegen Einbruch gerade in Erdgeschosswohnungen wird ebenfalls erhöht.

Demgegenüber stehen bei den untersuchten Wand-Pendellüfter noch immer akustische Herausforderungen. So ist das Eigengeräusch besonders in der höchsten Lüfterstufe bei keinem der untersuchten Exemplare vernachlässigbar. Eine störungsfreie Nachtruhe würde so erheblich eingeschränkt. Allerdings kann in der niedrigsten Lüftungsstufe meist ausreichend Ruhe sichergestellt werden. Mit einer entsprechenden zeitlichen Programmierung, die heute in allen Geräten umsetzbar ist, kann so zumindest eine Lüftung für einen sorgenfreien Feuchteschutz und oft sogar die reduzierte Lüftung gewährleistet werden. Dies ist besonders im Holzbau von übergeordneter Bedeutung.

Eine weitere Herausforderung beim Einbau von Wandlüftern stellt die Minderung der Fassaden-Schalldämmung dar. In ruhigeren Gebieten, in denen auch die nötige resultierende Gesamt-Fassaden-Schalldämmung geringer sein darf, wird ein Einbau kaum zu Komfortverlusten führen. Hingegen ist in hoch verkehrslärmbelasteten Zonen ein Einbau aktuell weniger zu empfehlen, da dann zu viel Außengeräusch nach innen dringt. Es bleibt zu hoffen, dass mit weiteren technischen Entwicklungen der Wandlüfter besonders die akustischen Kenngrößen verbessert und so auch die Akzeptanz bei allen am Bau Beteiligten gesteigert werden kann.

10. Förderhinweis

Wir bedanken uns für die Förderung dieser Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojekts «Lärmschutz im Erdgeschoss» bei «Vermögen und Bau Baden-Württemberg».

11. Literatur

[1] B. Locher *et al.,* "Differences between Outdoor and Indoor Sound Levels for Open, Tilted, and Closed Windows" (eng), *International journal of environmental research and public health*, Jg. 15, Nr. 1, 2018, doi: 10.3390/ijerph15010149.

[2] A. Drechsler, S. Reinhold, A. Ruff, M. Schneider und B. Zeitler, „Airborne Sound Insulation of Sustainable Building Facades" in *iCity. Transformative Research for the Livable, Intelligent, and Sustainable City*, Springer, Cham, 2022, S. 335–357, doi: 10.1007/978-3-030-92096-8_22.

[3] A. Drechsler, P. Eschbach und H.-M. Fischer, „Schallleistungsmessung von dezentralen Lüftungsgeräten" DAGA. Aachen, 2016.

[4] A. Ruff, A. Drechsler und B. Zeitler, "Untersuchungen zur Schallleistung und -dämmung eines dezentralen Lüftungsgerätes" DAGA. Hannover, 2020.

[5] A. Drechsler und A. Ruff, "Schallleistung von Wohnungslüftungsgeräten – Anwendung verschiedener Messmethoden" DAGA. Kiel, 2017.

[6] J. Krüger, L. Perchevska, B. Zeitler und M. Müller-Trapet, "Annoyance inside buildings due to road traffic noise" DAGA. Hamburg, 2023.

[7] N. Wüstemann, "Vergleich der akustischen Eigenschaften und der Gesamtenergiebilanz von dezentralen alternierenden Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung." Bachelorarbeit, Hochschule für Technik Stuttgart, Stuttgart, 2023.

[8] *ISO 10140-2: Acoustics - Laboratory measurement of sound insulation of building elements - Part 2: Measurement of airborne sound insulation*, 2021.

[9] *DIN EN ISO 717-1: Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Luftschalldämmung*, 2021.

[10] *DIN EN ISO 3743-1: Akustik – Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 für kleine, transportable Quellen in Hallfeldern – Teil 1: Vergleichsverfahren in einem Prüfraum mit schallharten Wänden*, 2011.

[11] *DIN 4109-35: Schallschutz im Hochbau – Teil 35: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Elemente, Fenster, Türen, Vorhangfassaden*, 2016.

[12] *DIN 4109-1: Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen*, 2018.

[13] *DIN 4109-5: Schallschutz im Hochbau – Teil 5: Erhöhte Anforderungen*, 2020.

[14] L. Müller, W. Kropp und J. Forssen, "Measurement, Simulation and Auralization of Indoor Road Traffic Noise" Stuttgart, 2022.

[15] C. Scrosati, F. Scamoni, M. Depalma und M. Ghellere, "Facade Sound Insulation as Protection to Outdoor Noise" ICA. Aachen, 2019.

[16] A. Meier, *Forschungsvorhaben Schallschutz gegen Außenlärm: Anforderungen zum baulichen Schallschutz gegen Außenlärm nach DIN 4109 unter Berücksichtigung des derzeitigen Stands der Technik als Grundlage für bauaufsichtliche Regelungen*. Fraunhofer IRB Verlag, 2021.

[17] *DIN 1946-6: Raumlufttechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung*, 2019.

[18] A. Maas, "Gebäudeenergiegesetz 2020: Einfach umgesetzt mit Kalksandstein.", https://www.kalksandstein.de/, 2020.

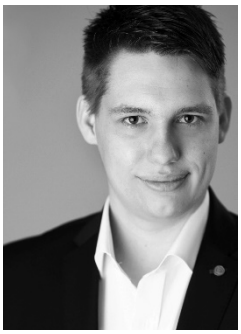
[19] *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden* (Gebäudeenergiegesetz - GEG)*, 2023.

[20] Energie-Fachberater.de, *Problemfall: Schimmel am neuen Fenster.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.energie-fachberater.de/ratgeber/ratgeber-schimmel/problemfall-schimmel-am-neuen-fenster.php.

[21] Wikipedia, *Fenstersanierung.* [Online]. Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Fenstersanierung.

Strömungs- und Geräuschanalyse eines dezentralen Lüftungsgerätes mit PIV und akustischer Kamera

Markus Wirnsberger
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Tobias Kruse
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Strömungs- und Geräuschanalyse eines dezentralen Lüftungsgerätes mit PIV und akustischer Kamera

1. Motivation

1.1. Baustein «Lüftungsgeräte» zum Erreichen eines klimaneutralen Gebäudebestands

Das Klimaschutzziel, die globale Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen, hat in Deutschland zu konkreten Maßnahmen geführt. Bereits 2016 verabschiedete die Bundesregierung den «Klimaschutzplan 2050», der 2021 durch das Klimaschutzgesetz aktualisiert wurde [1]. Ein zentraler Aspekt dieses Plans ist die Klimaneutralität des Gebäudebestands bis zum Jahr 2045.
Für Gebäude bedeutet dies die Umstellung der Versorgung von fossilen Energieträgern auf regenerative Energiequellen, sowie die deutliche Reduktion des Energiebedarfs. Der Energie bedarf von Gebäuden kann durch Dämmung und kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung reduziert werden.
Lüftungswärmeverluste betragen bei Gebäuden, die nach aktuellem Energiestandard GEG errichtet wurden, bis zu 50 % der Gesamtwärmeverluste [2]. Mit zunehmendem Dämmstandard steigt der Anteil der Lüftungswärmeverluste im Verhältnis zu den Transmissionswärmeverlusten. Lüftung mit Wärmerückgewinnung stellt daher einen wichtigen Baustein dar, um den Energiebedarf und die Heizlasten eines Gebäudes zu senken.

1.2. Schallemissionen von Lüftungsgeräten

In den letzten Jahrzehnten haben sich zentrale Lüftungsanlagen bewährt. Durch ihre zentrale Anordnung, häufig in Technikräumen, und die Möglichkeit, Schalldämpfer in den Lüftungsleitungen einzubauen, können störende Geräusche in schutzbedürftigen Räumen effektiv minimiert werden. Der Marktanteil dezentraler Lüftungsgeräte in Deutschland nimmt jedoch seit Jahren stetig zu; im Jahr 2018 überstieg dieser den der zentralen Lüftungsgeräte [3].

Die Installation von dezentralen Anlagen gestaltet sich, aufgrund der nicht erforderlichen Luftleitungen, deutlich einfacher als die von zentralen Lüftungsanlagen. Das dezentrale Gerät befindet sich dann jedoch in den jeweiligen schutzbedürftigen Räumen, was die Störung der Bewohner durch Lärm damit häufig wahrscheinlich macht.

In mehreren Studien [4, 5, 6] wurde der Schalldruckpegel von unterschiedlichen dezentralen Lüftungsgeräten untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass der Großteil der Geräte im Nennbetrieb die Anforderungen an den maximal zulässigen A-bewerteten Schalldruckpegel in schutzbedürftigen Räumen nicht erfüllen. Die gesetzlich geforderte Mindestanforderung nach DIN 4109-1 [7] für Geräusche aus raumlufttechnischen Anlagen im eigenen Wohnbereich schreibt maximale Schalldruckpegel im Raum von 30 dB(A) ($L_{A,F,max,n} \leq 30$ dB) in Schlaf- und Wohnräumen vor. Dies entspricht auch der Mindestempfehlung nach [8]. In [5] wurde bei zehn untersuchten dezentralen Lüftungsgeräten ein mittlerer Schalldruckpegel von > 40 dB(A) im erforderlichen Nennbetrieb gemessen. Der Schallschutz kann für die Sicherstellung eines hygienischen Mindestluftwechsels nach DIN 1946-6 von dezentralen Lüftungsgeräten aufgrund der Stichprobe in [5, 6] nicht gewährleistet werden. Es ist dadurch bei manchen Systemen denkbar, dass eine gute Raumluftqualität durch eine ausreichende Luftwechselrate und ein zufriedenstellender Schallschutz nicht gemeinsam möglich sind. Hierdurch sinkt die Akzeptanz von dezentralen Lüftungssystemen bei Planern, ausführenden Betrieben und Endnutzern. Eine mögliche Folge ist die Abkehr von einer kontrollierten Lüftung mit Wärmerückgewinnung.

2. Aufgabenstellung

Im Rahmen einer Literaturrecherche konnten nur drei Untersuchungen gefunden werden, bei welchen neben den lüftungstechnischen Kennwerten auch schalltechnische Kennwerte betrachtet wurden [4, 5, 6].
Dezentrale Lüftungsgeräte stellen aus akustischer Sicht eine komplexe Schallquelle mit verschiedenen Anregungs-, Übertragungs- und Abstrahlmechanismen dar (z. B. Strömungsgeräusche, Vibration, sekundärer Luftschall).
In dieser Fallstudie sollen die möglichen Optimierungspotentiale zum akustischen Verhalten von dezentralen Lüftungsgeräten und mögliche Zusammenhänge mit dem Strömungsverhalten am Beispiel eines ausgewählten Untersuchungsobjektes aufgezeigt werden.

3. Vorgehensweise und Versuchsaufbau

Im Rahmen dieser Untersuchung wird ein Versuchsstand verwendet, um die Geräuschemissionen dezentraler Lüftungsgeräte systematisch zu analysieren. Ziel ist es, die Geräuschanteile – zwischen Lüftergeräuschen und reinen Strömungsgeräuschen – differenziert zu betrachten und das Potenzial für akustische Optimierungen zu identifizieren.

Der Versuchsstand (Abbildung 2) ermöglicht den Betrieb eines dezentralen Lüftungsgeräts sowohl mit als auch ohne Einsatz des systemzugehörigen, internen Ventilators. Ein wesentliches Merkmal des Aufbaus ist ein extern betriebener Ventilator mit einem Schalldämpfer, der die Luftschallübertragung des externen Lüfters effektiv reduziert. Der Anschluss des außenliegenden Versuchsaufbaus erfolgt mittels einer Manschette körperschallentkoppelt an das Gehäuse des dezentralen Lüftungsgerätes. Dieser Versuchsaufbau ermöglicht eine isolierte Betrachtung der Strömungsgeräusche, unabhängig von den Geräuschen des systeminternen Lüfters.

Die Luftschallabstrahlung wurde über das Schallleistungsersatzverfahren gem. DIN EN ISO 3744 durchgeführt. Mit einer akustischen Kamera wurde die örtliche Schallpegelverteilung unter Anwendung der Nahfeldholographie (SONAH Verfahren) ermittelt. Für die Untersuchung der Strömungsdynamik wurde ein Particle Image Velocimetry (PIV)-System (Abbildung 3), sowie Computed Fluid Dynamics (CFD)-Simulation (Strömungssimulation) verwendet. Die Ergebnisse der PIV-Messungen wurden zur Verifizierung der Ergebnisse der CFD-Simulation verwendet.
Die Messungen wurden in zwei Betriebszuständen – ohne und mit aktiviertem internen Ventilator – bei unterschiedlichen Volumenströmen durchgeführt, um differenzierte Einblicke in die Quellen der Geräuschemissionen und die Charakteristika des Strömungsverhaltens zu erhalten. Als Versuchsobjekt wurde ein marktüblicher dezentraler Pendellüfter ausgewählt (Abbildung 1) und im Zuluftbetrieb untersucht. Der Abluftbetrieb hat sich bei den Voruntersuchungen als der leisere Betriebszustand gezeigt und ist daher nicht genauer untersucht worden.



a) Explosionsansicht b) Innenansicht c) Außenansicht

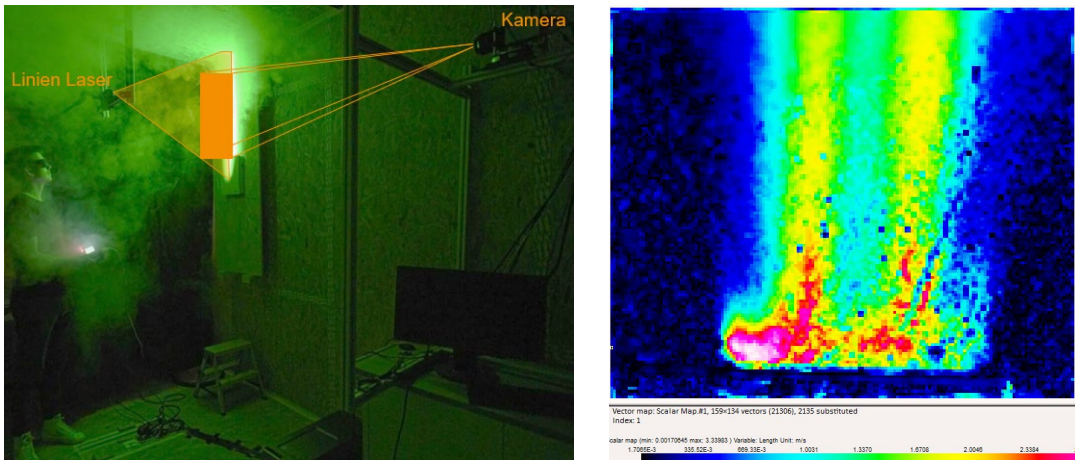
Abbildung 1: Ausgewählter Pendellüfter für die Untersuchungen



a) Außenansicht

b) Innenansicht,
ohne Gehäuseabdeckung

Abbildung 2: Versuchsaufbau



a) PIV-Versuchsaufbau in Betrieb

b) Mit PIV ermittelte Luftgeschwindigkeiten

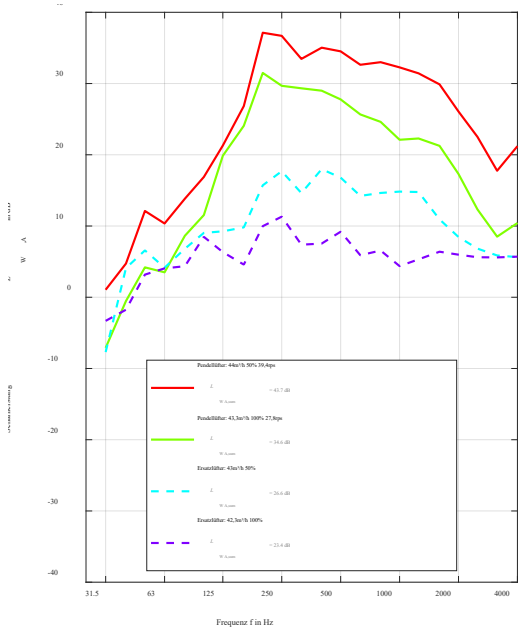
Abbildung 3: PIV Versuchsaufbau und Ergebnisse

4. Ergebnisse

Im ersten Schritt wurde die Luftschallleistung des Gerätes in unterschiedlichen Zuständen (eigener Ventilator o. ext. Lüftungsgerät, reduzierte Ausströmfläche) ermittelt. Um Untersuchungen zur Öffnungsfläche des Lüftungsauslasses vorzunehmen, wurde die Austrittsöffnung zur Hälfte abgeklebt. Die Leistung des Lüfters wurde dabei angepasst, sodass in beiden Fällen ein Volumenstrom von ca. 44 m³/h erreicht wurde. Die Verringerung der Öffnungsfläche führt zu einer drastischen Pegelerhöhung um ca. 9 dB im Einzahlwert (Abbildung 4). Die maßgebliche Pegelerhöhung ist dabei in Frequenzbereichen oberhalb von 200 Hz zu erkennen. Daraus lässt sich ableiten, dass aus akustischer Sicht große Luftaustrittsflächen zur Minimierung der Schallemissionen vorzuziehen sind.
Ebenfalls ist bei einer Betrachtung mit der akustischen Kamera zu sehen (Abbildung 4 rechte Seite), dass die Schallemission am Lüftungsauslass erfolgt, also nicht von der Gehäusefront abgestrahlt wird und sich die Austrittsfläche bei der Teilöffnung verkleinert. Die Ursache für die dominierende Geräuschquelle im inneren des dezentralen Lüfters ist daraus jedoch nicht ersichtlich.
Aus diesem Grund wurde der systeminterne Lüfter des dezentralen Lüftungsgerätes demontiert und ein identischer Volumenstrom mit dem außenliegenden Ersatzlüfter erzeugt. Daraus resultiert bei der Teilöffnung (Abbildung 2 b, oben) eine Minderung der Schallleistungspegel von 18 dB und bei vollem Lüftungsauslass (Abbildung 2 b, unten) eine Minderung um 11 dB (siehe gestrichelte Linien in Abbildung 4). Dies deutet darauf hin, dass der verbaute Lüfter eine maßgebliche Geräuschquelle im dezentralen Lüftungsgerät darstellt.

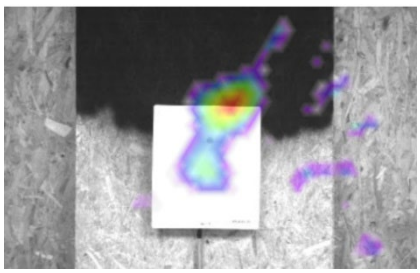
Eine Schmalbandanalyse (Abbildung 5 a) zeigt, dass die Lüfterdrehzahl f_n und deren Harmonischen sowie die Schauffelradpassierfrequenz f_{SPF} und deren Harmonische sich deutlich im Spektrum abheben und somit maßgeblich für die Luftschallgeräusche sind.
Ebenfalls lässt sich durch die Differenz der Schallleistungen bei unterschiedlich großen Ausströmflächen mit dem Ersatzlüfter vermuten, dass zusätzlich Strömungsgeräusche innerhalb des Lüftungsgerätes auftreten. Diese Strömungsgeräusche sind jedoch im Vergleich zum Anteil des Ventilators zu vernachlässigen.
Zusätzlich zu den akustischen wurden strömungstechnische Untersuchungen mit CFD-Simulationen durchgeführt, welche mithilfe von PIV-Messtechnik verifiziert wurden. Abbildung 6 zeigt eine vertikale Schnittebene durch die Austrittsöffnung der Lüftungsgeräte. Auf dieser Ebene ist die Luftgeschwindigkeitsverteilung dargestellt. Bei vollflächiger Austrittsöffnung und einem Volumenstrom von 44 m³/h beträgt die max. Luftgeschwindigkeit 3,2 m/s. Bei einer Reduktion der Austrittsöffnung auf 50 % beträgt die Austrittsgeschwindigkeit max. 6,4 m/s. Die Pegelerhöhung könnte daher auf die höhere Strömungsgeschwindigkeit am Auslass zurückzuführen sein. Dies wird unterstützt durch die in Abbildung 4 b) gezeigte Lokalisierung der Schallquelle. Hierbei lässt sich die Schallquelle am Luftauslass lokalisieren. Analog zu den Luftgeschwindigkeiten in Abbildung 6 verschiebt sich auch die Schallaustrittsöffnung nach rechts.

Eine weitere Schallquelle können die durch Körperschallanregung abstrahlenden Wandbauteile in direkter Nähe zum dezentralen Lüfter darstellen. Besonders in Gebäuden in Holzständerbauweise kann dies einen weiteren Beitrag zu den Schallemissionen im schutzbedürftigen Raum darstellen. Daher wurden Körperschallschwingungen in der direkten Nähe des dezentralen Lüftergerätes auf der Wandbeplankung erfasst (Abbildung 5 b). Die Körperschallpegel der angrenzenden Wand sind bei Betrieb des Ersatzlüfters nur geringfügig über dem Grundgeräuschlevel. Es besteht somit kein signifikanter Körperschalleintrag durch die Luftströmungen im Gerät. Wenn der interne Lüfter verwendet wird, zeigen sich spektrale Pegelerhöhungen bis zu 30 dB. Die Frequenz der Drehzahl f_n lässt sich im Terzspektrum erkennen. Besonders im Frequenzbereich von 80 Hz bis 2000 Hz ist eine maßgebende Anregung erkennbar. Bei höheren Lüfterdrehzahlen, z. B. verursacht durch eine kleinere Auslassöffnung, steigt auch der Körperschallpegel. Dies zeigt, dass der Lüfter nicht optimal körperschallentkoppelt im Gehäuse integriert ist bzw. selbst noch zu große Unwuchten oder eine nicht optimale Lagerung aufweist.

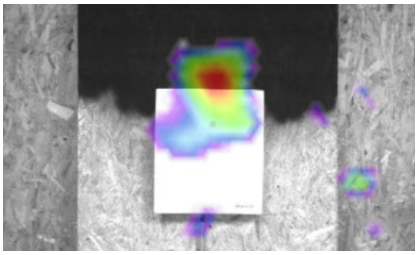


a) Schalleistungspegel

50% Ausströmflächen



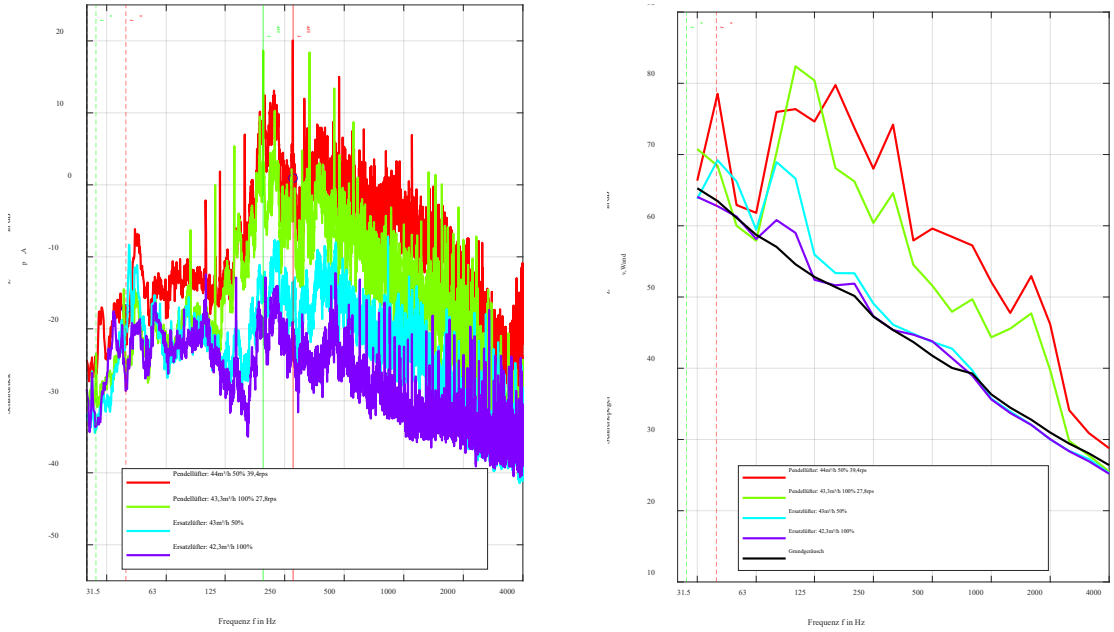
100% Ausströmflächen



b) Schallquellenortung

Abbildung 4: Ermittelte Schallleistungspegel des dezentralen Lüfters bei 100% und 50% Fläche der Ausströmöffnung und die zugehörigen Betrachtungen mit der akustischen Kamera

In den Untersuchungen zeigte sich ebenfalls, dass der verbaute Keramik Wärmetauscher im bisherigen Lüftersystem keine signifikante Geräuschquelle darstellt, jedoch auch keine zusätzliche Geräuschminderung erwirken kann.



a) Schmalbandanalyse, f_n Drehzahl, f_{SPF} Schaufelpassierfrequenz

b) Schnellepegel der Holzständerwand, f_n Drehzahl

Abbildung 5: Schmalbandige Frequenzanalyse des Luftschallpegels und Terzanalysen der Schnellepegel der Holzständerwand in der Nähe des dez. Lüftergerätes

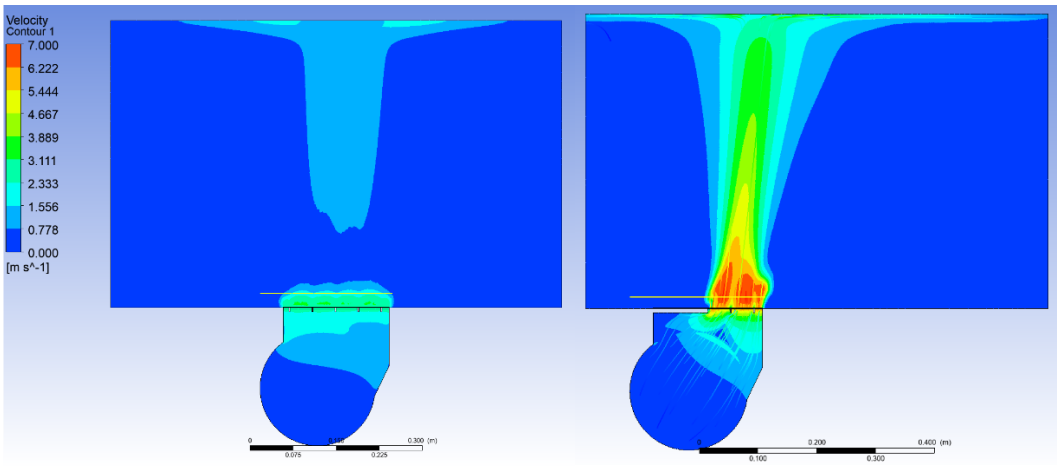


Abbildung 6: CFD-Simulation Geschwindigkeitsverteilung bei 100% (links) und 50% (rechts) Fläche der Ausströmöffnung des Lüfters

5. Zusammenfassung

In dem vorliegenden Projekt wurden mögliche Optimierungspotentiale bezüglich der Lautstärke dezentraler Lüfter, bzw. die Eignung unterschiedlicher Messmethoden zur Identifikation selbiger, anhand eines Pendellüfters untersucht. Hierbei wurde differenziert zwischen reinen Strömungsgeräuschen, Geräuschen ausgehend vom Ventilator und körperschallinduzierten Geräuschen. Anteile aller drei Ursachen konnten durch das Versuchsdesign identifiziert werden, wobei jedoch die Pegelerhöhung, verursacht durch den Lüfter, dominierend war. Dementsprechend birgt die Optimierung des Lüfters (z. B. Flügelgeometrie, Auswuchtgüte, Lagerqualität) das höchste Optimierungspotential.

Zusätzlich wurde eine Erhöhung des Geräuschniveaus bei der Verringerung der Luftaustrittsfläche festgestellt. Entsprechend können größere Luftaustrittsöffnung und die damit verbundenen geringeren Strömungsgeschwindigkeiten genutzt werden, um die Lautstärke zu reduzieren. Ebenfalls konnte eine Körperschallübertragung in die angrenzenden Bauteile festgestellt werden, was auf ein Optimierungspotential hinsichtlich Einbau und Lagerung des Lüfters deutet.
Die durchgeführten Untersuchungen an den dezentralen Lüftungsgerät geben keinen repräsentativen Überblick für alle am Markt befindlichen Geräte. Das Hauptziel war die Evaluierung der Messmethoden.

6. Quellenverzeichnis

[1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Klimaschutzplan 2050, 2016. Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist

[2] GEG:2020-08-08 Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze (Artikel 1 Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden)

[3] I. Consulting, Kontrollierte Wohnraumlüftung in Europa, 2015

[4] H. Manz, K. Baschnagel, D. Helfenfinger, H. Huber und G. Stupp, «Einzelraumlüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung,» EMPA, Abt. Bauphysik, Dübendorf, Schweiz, 2001

[5] A. Drechsler, P. Eschbach und H.-M. Fischer, «Schallleistungsmessung von dezentralen Lüftungsgeräten,» DEGA, Aachen, 2016

[6] J. Krüger, N. Wüstemann, A. Ruff und B. Zeitler, Wand-Pendellüfter – Vergleich der Akustik typischer Geräte mit normativen Anforderungen, DAGA 2024, Hannover

[7] DIN 4109-1:2018-01 - Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen

[8] DEGA Memorandum BR 0104 - Schallschutz im eigenen Wohnbereich, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2015

[9] C. Friebe, R. Krause, M. Kerscher und O. Velde, «Sound source localisation at an axial contrarotating fan by means of PIV and rotational beamforming.,» in 13th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, , 2019

Neues zur Raumlüftung aus der Schweiz – natürlich, hybrid und Low-Tech

Caroline Hoffmann
Institut Nachhaltigkeit und Energie am Bau,
Fachhochschule Nordwestschweiz
Muttenz, Schweiz



Neues zur Raumlüftung aus der Schweiz – natürlich, hybrid und Low-Tech

1. Einführung

Für die Lüftung von Wohn- und Bürogebäuden steht grundsätzlich eine breite Palette von Möglichkeiten zur Wahl: Angefangen bei der Minimallösung einer einfachen Fensterlüftung mit Abluftventilatoren in den Nassräumen, bis hin zur Maximallösung einer mechanischen Lüftungsanlagen mit Zu- und Abluft inkl. Wärmerückgewinnung (Abbildung 1).

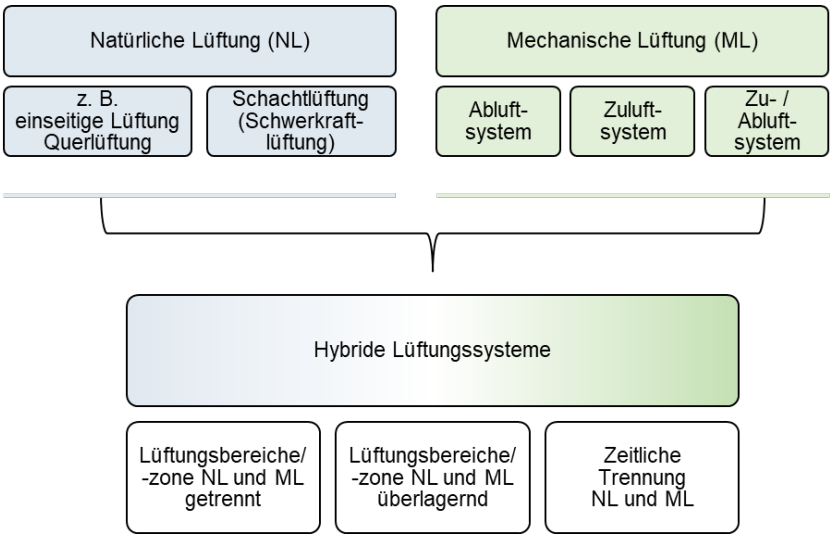


Abbildung 1: Übersicht Lüftungsarten und mögliche Kombinationen (nicht abschliessende Aufstellung).

Der Kosten- und Platzersparnis bei der Minimallösung stehen als handfeste Nachteile gegenüber, dass die Raumluftqualität und der Feuchteschutz stark vom korrekten Nutzerverhalten abhängen und dass die Lüftungswärmeverluste hoch sind. Die Maximalvariante gewährleistet die Raumluftqualität und den Feuchteschutz nutzerunabhängig und weist zusätzlich den Vorteil einer Energieeinsparung durch Wärmerückgewinnung auf. Nachteilig daran sind (zunächst) höhere Investitionskosten, eine höhere Herstellungsenergie (Graue Energie), der Platzbedarf für die Installationen sowie ein erhöhter Wartungsaufwand.
Um das Funktionieren der Minimallösung nutzerunabhängiger zu machen, existieren einfache Systeme mit unterschiedlichen Ansätzen. Meistens werden dabei Elemente der natürlichen Lüftung (in Deutschland: „freie Lüftung») mit mechanischer Lüftung kombiniert. In diesem Fall spricht man von hybriden Lüftungssystemen.
Um ihre Funktionsweise und Praxistauglichkeit zu untersuchen, wurden in den letzten Jahren in der Schweiz Forschungsprojekte hauptsächlich für die Nutzung Wohnen und Verwaltung durchgeführt. Über einige von ihnen berichtet dieser Beitrag.

1.1. Anforderungen Raumluftqualität Wohnen und Büro

Für mechanisch belüftete Gebäude gibt es normative Vorgaben für den Aussenluftvolumenstrom. Für natürlich belüftete Gebäude sind diese Werte nur begrenzt anwendbar, da sich zusätzlich zum Nutzerverhalten auch die Rahmenbedingungen (Aussenluftqualität, Lüftungseffektivität als Folge von Temperatur- und Druckdifferenzen, Nutzerverhalten) ändern. Grundsätzlich gilt auch bei natürlich belüfteten Gebäuden, dass «das Lüftungsprinzip […es] den Benutzern erlauben [muss], den notwendigen Luftvolumenstrom zu erhalten, sei es durch Lüftungsöffnungen für natürliche Lüftung oder mit mechanischer Lüftung» (SIA 180:2014 [1]).
Um Anhaltspunkte für natürlich belüftete Gebäude zu bekommen, kann die Thematik mit Bezug auf die Raumluftqualität mit dem Indikator CO_2 betrachtet werden. Dafür gibt es vier Kategorien (RAL «Raumluftqualität», oder IDA «Indoor Air Quality» abgekürzt). Ohne

besondere Vereinbarung gilt gemäss prSIA 382/1:2023 [2] bei mechanisch belüfteten Gebäuden die Kategorie IDA 2 (CO_2). Die entsprechenden Auslegungswerte für den Aussenluft-Volumenstrom pro Person gemäss SIA 2024:2021 [4] zeigt Tabelle 1 (Zeilen # 1 und 2). Dabei wird vorausgesetzt, dass mit unterstützender Fensterlüftung eine kurze ergänzende Stosslüftung vorgenommen werden kann. Da bei Fensterlüftung die Raumluft von der Aussenluftqualität abhängt, werden im Entwurf zur VDI 6022, Blatt 3:2023 (dort Tabelle 3) [5] Angaben zur «erreichbaren Raumluftqualität bei Anwendung der freien Lüftung oder einer unidirektionalen ventilatorgestützten Fortluftanlage» gemacht. Bei sauberer Aussenluftqualität (AUL 1) kann IDA 2 (die VDI verwendet den Begriff RAL) nur stundenweise eingehalten werden, IDA 3 kann eingehalten werden. Der Entwurf zur VDI 6022, Blatt 3:2023 ist in der Schweiz nicht gültig und bezieht sich nicht explizit auf den Indikator CO_2. Der Ansatz die Erwartungshaltung zu kalibrieren ist jedoch sinnvoll. In der Schweiz gibt es, wie Kapitel 2.3 zeigt Bestrebungen, natürliche Lüftung normativ detaillierter zu regeln. Ein ähnlicher Ansatz mit Bezug auf die Erwartungshaltung könnte damit auch hier zur Anwendung kommen.

Tabelle 1: Aussenluftvolumenströme für die Nutzungen Wohnen und Verwaltung in Abhängigkeit von der Raumluftqualität (IDA Kategorie).

#	Nutzung	Kategorie IDA(CO_2)	empfohlener Auslegungswert der CO_2-Konzentration in der Raumluft ppm	Aussenluft-Volumenstrom pro Person/Zimmer am Tag m^3/h	Aussenluft-Volumenstrom pro Person / Zimmer bei Nacht m^3/h
1	Wohnen	2	1100	29 /30[1]	15 / 30[2]
2	Verwaltung	2	1100	29	-
3	Wohnen	3	1500	18	5
4	Verwaltung	3	1500	18	-

[1]= Ergänzend findet sich in SIA 382/5:2021 [6] «Mechanische Lüftung von Wohngebäuden» der Wert pro Raum.
[2] = SIA 382/5 [6] gibt die Raumnutzung bei Nacht mit (bis zu) zwei Personen an.

Der Feuchteschutzluftwechsel wird in der Schweiz in SIA 180:2014 [1] definiert. Als Anhaltspunkt können die folgenden Werte dienen: 0.10 bis 0.22 h^{-1} (Wohnung mit 190 m^3 Volumen, drei Bewohner, tiefe Feuchteproduktion in der Heizperiode, Wetterdaten von Zürich [7]).

2. Hybride Lüftungssysteme

2.1. Definition und Systeme

Eine hybride Lüftung versteht sich als Kombination aus natürlicher und mechanischer Lüftung. In ihrer einfachsten Form sind hybride Lüftungen sehr verbreitet: immer, wenn im Wohnbereich Bereiche über einen Abluftventilator entlüftet werden (z. B. Bad, WC oder Küche) und andere Bereiche über Fensterlüftung be- und entlüftet werden, ist das System strenggenommen ein hybrides Lüftungssystem. Davon ausgehend wird hybride Lüftung wie folgt definiert: «*Lüftung, die auf natürliche und mechanische Be- und Entlüftung in der gleichen Nutzungseinheit angewiesen ist und in Abhängigkeit von der gegebenen Situation betrieben wird (mit entweder natürlichen oder mechanischen Antriebskräften bzw. einer Kombination dieser Antriebskräfte). Für die Funktion des Systems sind daher Elemente zur Sicherstellung von natürlicher Lüftung (wie z. B. Fenster, Aussenbauteil-Luftdurchlässe) wie auch der mechanischen Lüftung (Luftkanäle, Ventilatoren) erforderlich*» [8].

Für hybride Lüftungen gibt es viele Systemvarianten. Innerhalb der Schweiz werden für Wohn- und Verwaltungsgebäude sieben häufig vorkommende Systeme identifiziert. Am häufigsten kommen im Wohnbereich zwei Systeme vor: a) Manuelle Fensterlüftung mit bedarfsgesteuerter Abluftanlage in Bad / WC und b) Mechanische Lüftung mit ergänzender natürlicher Lüftung für Intensiv- oder (saisonalen) Alternativbetrieb (Abbildung 2). Abbildung 3 zeigt ein weiteres System.

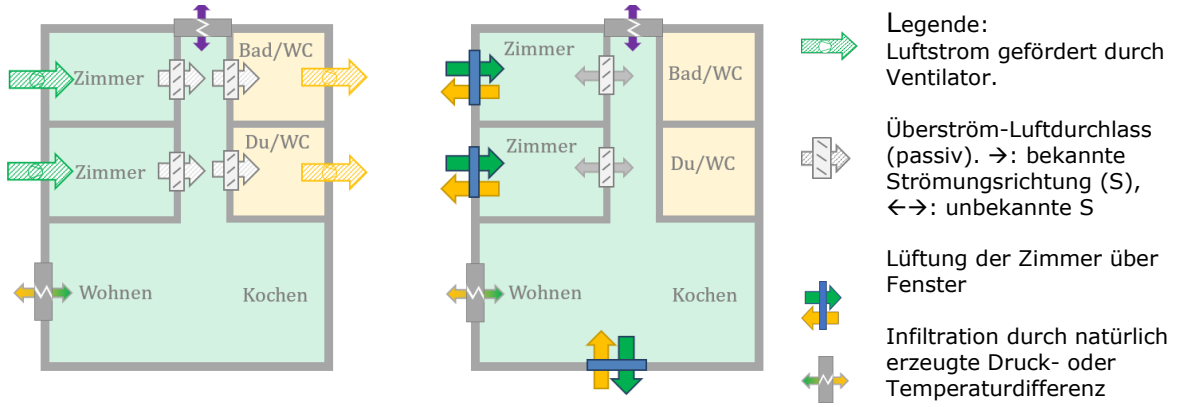


Abbildung 2: Beispiel einer Wohnung mit mechanischer Lüftung (links) mit ergänzender natürlicher Lüftung für Intensiv- oder Alternativbetrieb (rechts). Farbcode: grün = Zuluft / Aussenluft, gelb = Abluft / Fortluft.

2.2. Planungshinweise

Hybride Lüftungssysteme bedürfen einer gewerkeübergreifenden Planung. Spezifische Komponenten wie Aussenbauteil-Luftdurchlässe, Fensterlüfter und Überströmelemente sowie die Regelung benötigen durch das Zusammenspiel aus mechanischer und natürlicher Lüftung bei der Planung erhöhte Sorgfalt. Planungshinweise gibt Tabelle 2.

Im Vergleich zu einer unkontrollierten Lüftung über gekippte Fenster sind, bei vergleichbarer Raumluftqualität (im Sinne einer maximalen CO_2-Konzentration), die Lüftungswärmeverluste bei Konzepten mit hybrider Lüftung oder bei einfachen Lüftungssystemen mit Fensterlüftern oder Aussenbauteilluftdurchlässen bis zu maximal 15 % [9], [10] tiefer. Bezogen auf die graue Energie und auf Treibhausgasemissionen haben Luftleitungen einen grossen Anteil an der Belastung durch das Lüftungssystem. Mit ihrer Minimierung kann eine Reduktion aus der Erstellung für die Lüftungstechnik von bis zu 20 - 40 % erreicht werden [11],[12].

Mit einer guten, meist auch gewerkeübergreifenden Planung können im Idealfall die Vorteile einer mechanischen Lüftung (z.B. konstante Raumluftqualität, garantierte Feuchteschutzlüftung, Wärmerückgewinnung) mit denen einer natürlichen Lüftung (z. B. Nutzereinfluss, Nachtlüftung, reduzierter Technikaufwand) kombiniert werden. Garantierte und konstante Anforderungen an die Luftqualität und an den thermischen Komfort sind durch den Anteil der natürlichen Lüftung allerdings nicht erfüllbar. Wie bei mechanischen Systemen ist insbesondere bei hybriden Lüftungen eine Nutzervereinbarung zu empfehlen.

Der Forschungsbericht [8] kann unter der folgenden Adresse bezogen werden:
https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=48267

Tabelle 2: Planungshinweise für Komponenten von hybriden Lüftungssystemen. Verwendete Abkürzungen: M = Messung, S/B = Simulation/Berechnung, EW = Expertenworkshops, T = Theorie.

Komponente	**Planungshinweis**	**Quelle/ Methode**
Aussenbauteil-Luftdurchlässe (ALD), Fensterlüfter	Zugerscheinungen sind ein häufiges Problem in Verbindung mit Fensterlüftern oder ALD. Durch bestimmte Maßnahmen (Platzierung, Öffnungsquerschnitt, Strömungsbegrenzer) können diese reduziert werden. Ein Einbau in Hochhäusern und an lauten Standorten ist jedoch nicht ratsam. In vielen Fällen sind die gemessenen Luftvolumenströme geringer als erwartet. Dies gilt selbst dann, wenn die ALD zusammen mit einfachen Abluftanlagen betrieben werden. Jeder Aufenthaltsraum (mit Ausnahme von Durchströmbereichen) muss eine Aussenluftzufuhr enthalten. Für den hygienischen Luftwechsel sind pro Raum oftmals zwei ALD oder Fensterlüfter erforderlich.	[7] S, [13] M, [14] M, [15] M, [16] M, [8] EW
Fenster	Ohne vorgängige Prüfung entsprechen die resultierenden Luftvolumenströme durch Fensterlüftung oft nicht den primären Lüftungsanforderungen, z. B. für die Raumluftqualität. Dies ist auf unzureichende Druckunterschiede sowie Markisen, Vorhänge, geschlossene Jalousien usw. zurückzuführen, die den Luftaustausch behindern können. Eine ausschließlich manuelle Fensterlüftung für Schlafräume ist ungeeignet, da bei natürlicher Lüftung die CO_2-Konzentration über einen längeren Zeitraum nur dann unter dem Grenzwert gehalten werden kann, wenn ein Fenster gekippt bleibt. Dies kann wiederum zu hohen Wärmeverlusten führen.	[16] M, [10] S/B
Aktive Verbundlüfter (aVL), passive Überströmelemente (pUE)	Zunächst muss unterschieden werden, ob der Luftaustausch über aVL oder pUE erfolgen soll. Bei pUE in Form von Gittern in oder Spalten unter dem Türblatt wird der Luftaustausch allein durch natürliche Antriebskräfte induziert. Das funktioniert meist nicht. pUE müssen entsprechend dimensioniert sein (Probleme: ausreichend freier Querschnitt, störender Lichteinfall, Schallschutz). Häufige Planungsfehler sind unzureichende Querschnitte von pUE zwischen Zu- und Abluftzonen. Insbesondere bei Badtüren werden die höheren Anforderungen oft nicht erfüllt. Das Fehlen von pUE kann die Funktion von Lüftungsmaßnahmen stark gefährden. In der Praxis wurden sehr gute Erfahrungen mit Verbundlüftungssystemen mit aVL in Wohnungen gemacht.	[15] M, [10] M, [17] M, [18] T, [19] T, [8] EW
Filter in ALD und Fensterlüftern	Die Verwendung von Filtern ist sinnvoll. Für eine rein natürliche Lüftung ist der Druckabfall in Filtern in Aussenbauteil-Luftdurchlässen jedoch zu hoch. Werden Filter eingesetzt ist damit immer eine mechanische Unterstützung notwendig.	[13] M, [20] M, [21] M
Steuerung / Regelung	Bei Konzepten mit automatischen Lüftungsöffnungen ist die Schnittstelle zwischen den verschiedenen beteiligten Gewerken (Architektur, Fassade, Elektro, Mess- und Regeltechnik und HLK) entscheidend für die Funktion der Steuerung. So muss beispielsweise bei automatischen Lüftungsöffnungen als Fenster die Schnittstelle und Abhängigkeit zwischen Sonnenschutz- und Lüftungsfunktionen im Steuerungskonzept klar definiert sein.	[22] T, [23] T, [24] M,
Ablufthauben	Beim Einsatz von Ablufthauben muss sichergestellt werden können, dass keine hohen Unterdrücke und als Folge unerwünschte Nachströmungen über hygienisch heikle Pfade, wie z. B. Installationsschächte entstehen. Dies ist jedoch auch (in geringerem Maße) bei mechanischen Abluftsystemen der Fall. Bei Ablufthauben muss die Nachströmung frischer Luft gewährleistet sein. Ist diese nicht definiert, kann ein erheblicher Unterdruck (bis zu 120 Pa) entstehen und / oder Luft aus undefinierten Quellen nachströmen.	[25] M, [15] M, [26] M

2.3. Normatives und Ausblick

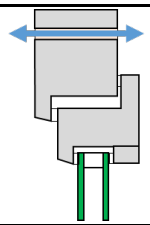
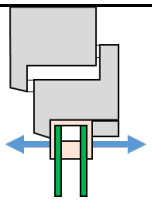
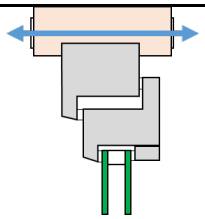
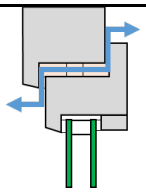
Trotz der weiten Verbreitung in der Praxis sind hybride Lüftungen in der Schweiz bislang nicht normativ geregelt und der Begriff ist unscharf definiert. Normativ gut abgedeckt sind mechanische Lüftungen, aber für das Zusammenwirken von mechanischer und natürlicher Lüftung gibt es keine Planungshilfen und Planungsregeln, die auf schweizerische Verhältnisse zugeschnitten sind. Auch in Energienachweisen sind hybride Lüftungssysteme bisher unbefriedigend erfasst.
Aus diesem Grund wird derzeit in der Schweiz die SIA-Norm 382/3 «Natürliche und hybride Lüftung von Gebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen» erarbeitet. Die Publikation ist für das Jahr 2027 zu erwarten.

3. LowTech Lüftungen in Wohngebäuden

3.1. Passive Fensterlüfter

In der Schweiz erfolgen rund 70 % der Erneuerungen an Wohngebäuden in Etappen. Werden bei einer Erneuerung nur die Fenster ausgetauscht, verbessert sich in der Regel die Luftdichtigkeit des Gebäudes. Gibt es im Gebäude thermische Schwachstellen, so kann es nach dem Fensterersatz zu Feuchteschäden (Schimmel) kommen. Wenn keine Lüftungsanlage eingebaut wird, besteht die Möglichkeit, durch den Einbau von Fensterlüftern (siehe Tabelle 3) gezielt eine gewisse nutzerunabhängige Grundlüftung sicherzustellen. Fensterlüfter sind Lüftungselemente, die in das Fenster integriert sind oder im direkten Zusammenhang mit dem Fenster stehen (Tabelle 3). Eine typische Anwendung als Kombination aus Fensterlüftern und Abluftventilatoren in Bad und WC zeigt Abbildung 3.
Gemäss der in Abschnitt 2.1 genannten Definition zu hybriden Lüftungssystemen ist das System als hybrid einzustufen, wenn die Abluftanlage zeitgesteuert ist, oder wenn es bei einer permanent betriebenen Abluftanlage Bereiche in der Wohnung gibt, die ausschliesslich natürlich belüftet werden.

Tabelle 3: Definitionen zum Begriff Fensterlüfter (FeLue). Definitionen sinngemäss entnommen aus [2].

Prinzip				
Beschreibung	FeLue als Aufsatzelement im Blend- oder Flügelrahmen	FeLue als Aufsatzelement oberhalb des Glasfalzens	FeLue als Aufsatzelement über oder neben dem Blendrahmen	Fensterfalzlüfter

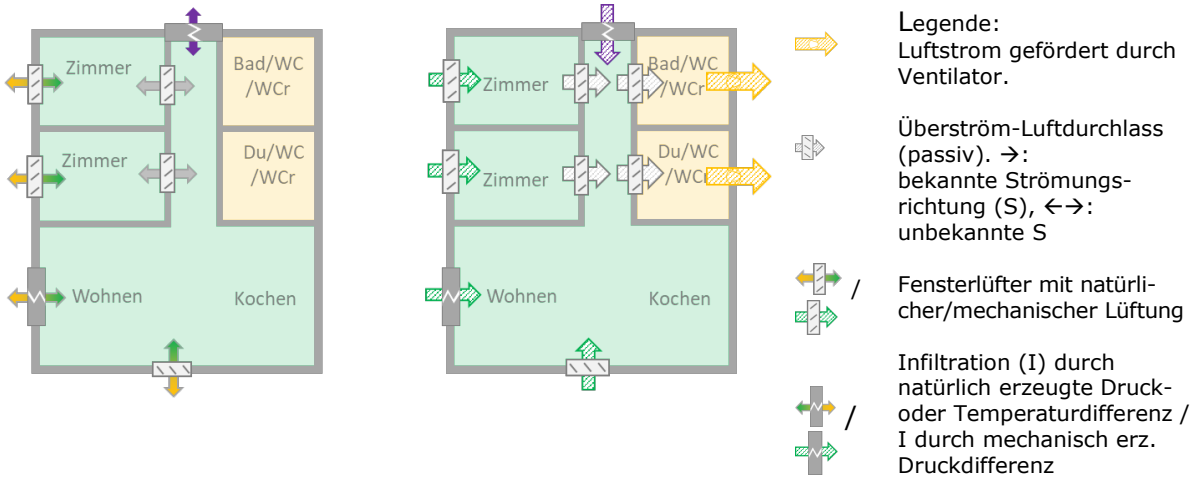


Abbildung 3: Wohnung mit Fensterlüftern in zwei Betriebszuständen. Links: Natürliche Lüftung mit Fensterlüftern mit zeitgesteuerter Abluftanlage im Betriebszustand «aus», rechts: mechanische Abluftanlage mit Fensterlüftern. Farbcode: grün = Zuluft / Aussenluft, gelb = Abluft

Fensterlüfter werden zunehmend auch in neuerrichteten Wohngebäuden eingesetzt. Nachstehend sind Ergebnisse einer Untersuchung von Mehrfamilienhäusern mit passiven Fensterlüftern (ohne Ventilator) im Zusammenhang mit einer permanenten oder zeitgesteuerten Bedarfslüftung über Abluftventilatoren in Küche und Bad dargestellt. Das Projekt umfasst Neubauten, Totalsanierungen und (wenige) Gebäude mit reinem Fensterersatz. Es konzentriert sich auf die Frage, wie gut Gebäude mit Fensterlüftern in der Praxis funktionieren und ob die Gebäude schimmelfrei sind. Insgesamt werden 28 Mehrfamilienhäuser durch Ortsbesichtigungen, Messungen in acht Wohnungen und eine Befragung aller Bewohner untersucht.

Die Messungen im Winter 2018/19 sind zweistufig: Kurzzeitmessungen richten den Fokus auf die Volumenströme, die Luftdichtigkeit und die Relativdrücke in den Wohnungen. Langzeitmessungen umfassen CO_2-Konzentrationen, Innen- und Außenlufttemperaturen und -feuchten sowie Betriebszustände der Abluftventilatoren. In sechs von acht Wohnungen deckt der gemessene Außenluftvolumenstrom nur 35 % bis 80 % der in den Schweizer Baunormen empfohlenen Menge ab. In zwei Wohnungen werden die empfohlenen Werte um 34 % bzw. 38 % überschritten (Tabelle 4). Die Luftdichtheit aller Wohnungen schwankt zwischen q_{a50}-Werten von 0.5 und 1.3 $m^3/(h\ m^2)$ (±10 %). Damit liegen vier der acht Wohnungen unter dem Zielwert von 0.6 $m^3/(h\ m^2)$ und keine Wohnung überschreitet den Grenzwert von 1.6 $m^3/(h\ m^2)$ gemäss SIA 180:2014 [1]. Die CO_2-Messungen zeigen, dass in den Schlafräumen der Mittelwert zwischen 650 und 3'440 (± 70 – 160) ppm liegt (Abbildung 4).

Die Befragung wird im Winter 2017/18 durchgeführt und befasst sich mit dem Lüftungsverhalten der Nutzer, der thermischen und akustischen Behaglichkeit, der Raumluftqualität und der Nutzerzufriedenheit. Die 270 ausgefüllten und zurückgesandten Fragebögen lassen Rückschlüsse auf zukünftige Lüftungskonzepte zu. So zeigt es sich zum Beispiel, dass in Wohnungen, in denen die Wärme über Heizkörper verteilt wird, Zugluft durch Fensterlüfter seltener angegeben wird als in Wohnungen mit einer Fußbodenheizung. Insgesamt wird die Raumtemperatur als (fast) angenehm empfunden (Tabelle 5). Die Luftfeuchtigkeit wird in der gesamten Befragung als niedrig beurteilt. Befragt nach der Raumluftqualität sind die Bewohner in allen Gebäudetypen "etwas zufrieden". Eine Bereitschaft, wieder in ein Gebäude mit Fensterlüftern zu ziehen, interpretiert als Gesamtzufriedenheit mit den Fensterlüftern, ist in allen Gebäuden mehr oder weniger vorhanden. Insgesamt berichten 8 % (N = 21/263) von Schimmelproblemen, meist im Badezimmer.

Tabelle 4: Vergleich von vorgegebenen/geplanten und gemessenen Volumenströmen. Verwendete Abkürzungen: PFL = passiver Fensterlüfter, VS = gemessener Volumenstrom, W = Wohnung, W1 = Wohnung 1, W2 = Wohnung 2, ACH = Luftwechselrate.

	ZH_3	**ZH_5**	**BB**	**DT_3**
Produkt PFL	Sonoslot –P475, Renson	Siegenia Aeromat VT, Typ DF2	ALD Aerex AL-dB-450-40r	Helios ALEF 45
Spezifizierter VS PFL (m^3/h)	@ 2 Pa: 8.3 @4 Pa: 11.8 @ 8 Pa: 17.0 @10 Pa: 19.2	@5 Pa: 25	@4 Pa: 14.0 @ 8 Pa: 20.0 @10 Pa: 22.0	@ 2 Pa: 12 @4 Pa: 18 @ 8 Pa: 28 @10 Pa: 34
Gemessener VS PFL (m^3/h)	8 (± 4 m^3) - 20 m^3/h (± 4 m^3)	9 (± 4 m^3) - 18 m^3/h (± 4 m^3)	18 (± 4 m^3) - 30 m^3/h (± 2 m^3)	8 (± 4 m^3) - 28 m^3/h (± 2 m^3)
Geplanter VS pro W (m^3/h)[1]	W1: 80, W2: 90	W1: 80	W1: 120, W2: 120	W1: 120, W2: 120
Gemessener VS pro W (m^3/h)	W1: 62 (± 7) @ 5 (± 0.15) Pa W2: 68 (± 10) @ 3 (± 0.15) Pa	W1: 38 (± 6) @ 3-4 (± 0.15) Pa	W1: 166 (± 7) @ 17 (± 0.17) Pa W2: 107 ± 4) @ 11 (± 0.15) Pa	W1: 72 (± 6) @ 9 (± 0.15) Pa W2: 42 (± 8) @ 2 (± 0.15) Pa
Gemessener VS pro Person (m^3/h)	W1: 62, W2: 23	W1: 38	W1: 42, W2: 54	W1: 24, W2: 8
Gemessene ACH (h^{-1})	W1: 0.44, W2: 0.28	W1: 0.25	W1: 0.6, W2:0.55	W1: 0.33, W2:0.22

Tabelle 5: Zufriedenheit mit dem thermischen Komfort, der Raumluftqualität und den Fensterlüftern. Ergebnisse für Gebäudetypen. Verwendete Abkürzungen: $\bar{x}$ = Mittelwert, *s* = Standardabweichung, *N* = Anzahl abgegebene Voten.

		$\bar{x}$	s	N	Interpretationshilfe
Zufriedenheit mit	Raumtemperatur	2.79	1.19	126/217	2 = kalt, 3 = angenehm
	Luftfeuchtigkeit	3.83	0.95	114/215	3 = angenehm, 4 = trocken
	Raumluftqualität	3.93	1.15	115/207	3 = mittelmässig, 4 = etwas zufrieden, 5 = zufrieden
	Zugluft	2.04	1.59	212	2 = manchmal, 3 = häufig
	Fensterlüftern	1.31	0.74	251	1 = vielleicht, 2 = ja

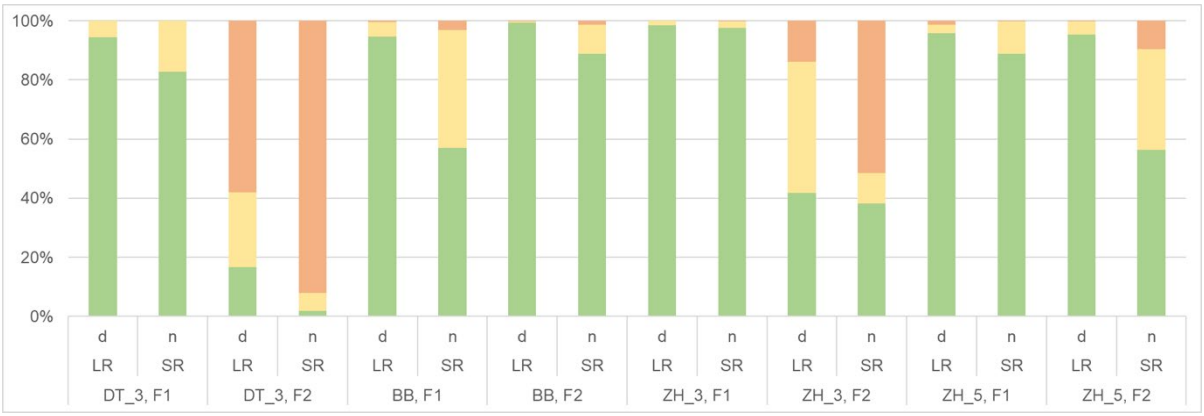


Abbildung 4: Gemessene CO_2-Konzentrationen im Schlaf- und Wohnzimmer (BR, LR) in den gemessenen Wohnungen während des Tages (d) und der Nacht (n). Die RAL-Klassen zeigen an:
RAL 2 (grün) = < 1000 ppm, RAL 3 (gelb) = 1000-1400 ppm, RAL 4 (rot) = >1400 ppm. Verwendete Abkürzungen: F1 = Wohnung 1, F2 = Wohnung 2

Der Forschungsbericht [15] kann unter der folgenden Adresse bezogen werden:
https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=40724.

3.2. Schwerkraftlüftung von innenliegenden Bädern

Bei der Schwerkraftlüftung sind einzelne Geschosse über einen Lüftungskanal oder ein Lüftungsrohr mit einem Lufteinlass z. B. im Kellergeschoss und einem Luftauslass über Dach verbunden. Bei der in [27] an einem viergeschossigen Neubau eines MFH in Basel untersuchten «Kölner Lüftung» verfügt jedes angeschossene Badezimmer über je ein eigenes Rohr für die Zu- und Abluft und die Luftführung beschränkt sich auf diesen Raum. Das Zuluftventil ist in Bodennähe und das Abluftventil ist nahe der Decke platziert.

Da die Schwerkraftlüftung von den Druckunterschieden über die Gebäudehöhe abhängt, schwankt sie jahreszeitlich. Die Schwerkraftlüftung erfordert nur wenige (z. B. ein steuerbares Zuluftventil) oder gar keine technischen Komponenten. Es handelt sich um ein natürliches Lüftungssystem mit geringem technischem Aufwand.

Eine detaillierte Überwachung über ein ganzes Jahr hinweg erfasste das Verhalten und die Wirksamkeit der Schwerkraftlüftung in allen Jahreszeiten. Im Winter führt die Schwerkraftlüftung wie zu erwarten zu höheren Luftwechselraten in den Innenbädern als im Sommer. Im Allgemeinen kann die Feuchtigkeit mit der Schwerkraftlüftung abgeführt werden. Die Analyse zeigt, dass sich z. B. in der Übergangszeit (Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen 8 – 10 K) im Badezimmer ein Luftwechsel von ca. 1.0 1/h einstellt und bei geschlossener Badezimmertür die Feuchtigkeit eines Duschvorgangs nach ca. 3.5 h abgeführt ist.

Grundsätzlich funktioniert die Schwerkraftlüftung dann nicht, wenn die Innen- und die Umgebungstemperaturen gleich sind, was nur im Sommerhalbjahr vorkommt. Wenn unter diesen Bedingungen die Badezimmertür nach dem Duschen 24 Stunden lang geschlossen bleibt, erfolgt keine Abführung der Feuchtigkeit. Im Sommer muss das innenliegende Badezimmer also indirekt über die übrigen Räume der Wohnung belüftet werden (mit offen–stehenden Zimmertüren bei Querlüftung über die Fenster). Damit ist die Schwerkraftlüftung im Sommer nicht nutzerunabhängig und bedarf einer Nutzerinstruktion.

Um die Nutzerunabhängigkeit zu gewährleisten wäre es im Sinne einer hybriden Lüftung denkbar, saisonal im Sommer einen Ventilator zuzuschalten, mit entsprechenden Nachteilen hinsichtlich der Einfachheit des Systems.

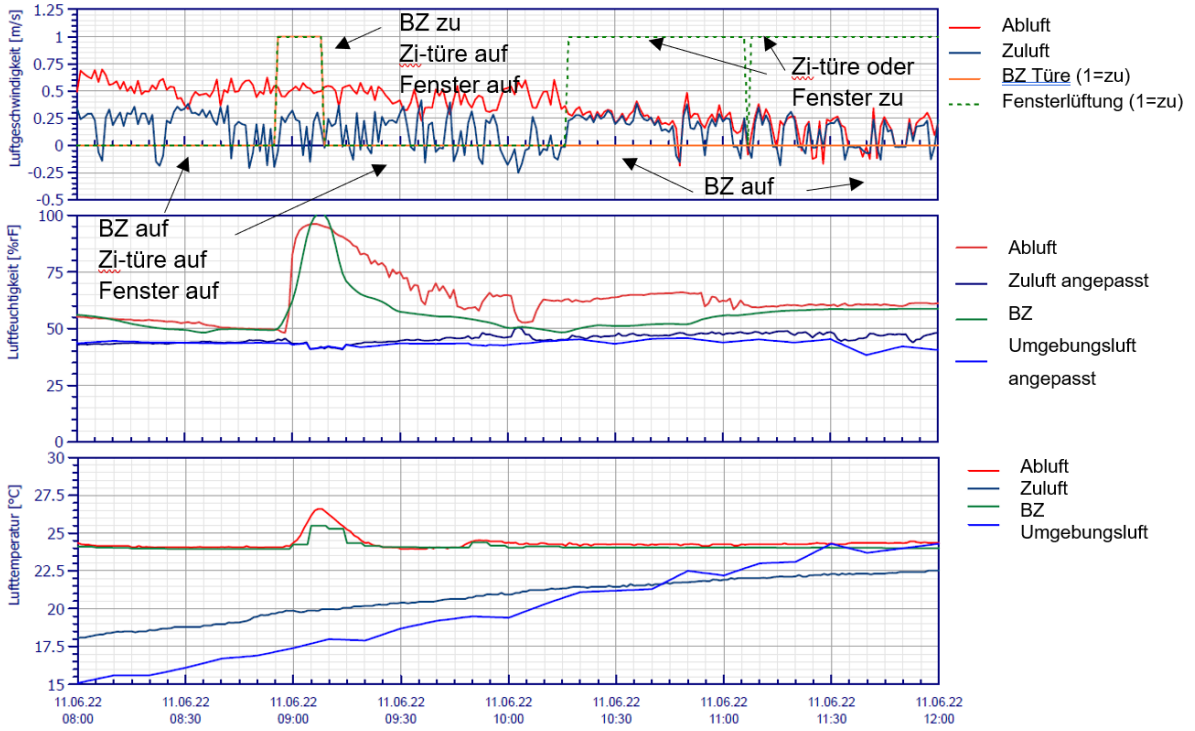


Abbildung 5: Duschen bei geschlossener Badezimmertür, danach: a) Luftgeschwindigkeit im Zu- und Abluftkanal und Öffnungszustand von Türen und Fenstern (Badezimmertür orangene Linie: geschlossen = 1, offen = 0, Fenster/Zimmertür grüne Linie: geschlossen = 1, offen = 0), b) Temperaturen im Zu-/Abluftkanal und im Bad, c) relative Luftfeuchtigkeit im Zu-/Abluftkanal und im Bad (Messungen: 2 s Zeitschritte) [27].

Der Forschungsbericht [27] kann unter der folgenden Adresse bezogen werden: https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=49263.

4. Fazit

Hybride Lüftungen weisen in zwei Bereichen ein energetisches Einsparpotential auf. Zum einen können im Vergleich zu einer unkontrollierten Lüftung über gekippte Fenster Lüftungswärmeverluste reduziert werden. Zum anderen ist es möglich, die Luftleitungen gegenüber einer mechanischen Lüftung wesentlich zu reduzieren, so verringern sich die graue Energie bzw. die Treibhausgasemissionen aus der Erstellung.

Mit hybriden Lüftungen können bei Wohn- und Bürobauten spezifische Lüftungsaufgaben abgedeckt werden. Allerdings können hybride Lüftungen nur dann eingesetzt werden, wenn kein kontinuierlicher, garantierter Qualitätsstandard für die Raumluftqualität erforderlich ist, wie das z. B. in Gebäuden für vulnerable Personen der Fall sein könnte. Durch den Anteil an natürlicher Lüftung sind die Gebäude mit ihrer Nutzung gegenüber den Aussenbedingungen exponierter als Gebäude mit einer Zu- und Abluftanlage. Um daraus resultierende Einschränkungen, sei es bei der thermischen Behaglichkeit, sei es beim Lärm, zu vermeiden und eine korrekte Auslegung zu ermöglichen, bedarf es einer sorgfältigen Planung und Ausführung. Es empfiehlt sich für Planende bzw. Ausführende, bestimmte Punkte (wie z. B. die Nutzung der Räume, Nutzereingriffe, Anforderungen an die Behaglichkeit) in einer Nutzungsvereinbarung festzuhalten. Das Zusammenspiel aus natürlicher und mechanischer Lüftung erfordert eine gewerkeübergreifende, integrale Planung.

Eine Hauptfrage bei den Untersuchungen zu Fensterlüftern war, ob die Fensterlüfter einen nutzerunabhängigen Luftwechsel zur Vermeidung von Schimmelpilzschäden gewährleisten können. Die hierfür erforderliche Luftmenge ist viel geringer als der hygienische Luftwechsel für Personen (siehe Kap. 1.1). Die in der Studie ermittelte Schimmelpilzhäufigkeit liegt

im Bereich für «normale» Wohnungen in Mehrfamilienhäusern [13]. Dies deutet darauf hin, dass der Einbau von Fensterlüftern nicht in allen Fällen den Feuchteschutz und damit zwangsläufig auch nicht den erforderlichen Luftwechsel pro Person gewährleisten kann. Bei der Schwerkraftlüftung für Bäder wurden keine Untersuchungen zum Schimmelvorkommen gemacht. Das System funktioniert im Winter bei einer hohen Temperaturdifferenz gut, im Sommer muss für eine Feuchteabfuhr (zusätzlich) von den Nutzenden gelüftet werden.

5. Dank

Mein Dank geht an Prof. Dr. Achim Geissler für das Gegenlesen der Veröffentlichung.

6. Literatur

[1] SIA 180:2014, *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*. Schweiz: Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, 2014, pp. 1–72.

[2] PrSIA 382/1:2022-11, *Mechanische Lüftung in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen*. Schweiz: Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, 2022, pp. 1–217.

[3] prSIA 382/1:2022-06, *Mechanische Lüftung von Gebäuden - Grundlagen und Anforderungen*. Schweiz: Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, 2022, pp. 1–164.

[4] SIA 2024:2021, *Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik*. Schweiz: Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, 2021, p. 80.

[5] VDI 6022 Blatt 3:2023 (Entwurf), *Raumlufttechnik, Raumluftqualität Beurteilung der Raumluftqualität*. Deutschland: VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), 2023, pp. 1–16.

[6] SIA 382/5:2021, *Mechanische Lüftung in Wohngebäuden*. Schweiz: Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein, 2021, pp. 1–72.

[7] C. Hoffmann, A. Geissler, and H. Huber, «Fensterlüfter in der Gebäudesanierung,» *Bauphysik*, vol. 37, no. 3, pp. 169–178, 2015.

[8] C. Hoffmann, A. Primas, C. Hauri, V. Dorer, and H. Huber, «HyLue: Hybride Lüftung – ein guter Kompromiss?,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2023.

[9] H. Huber, *Komfortlüftung in Wohngebäuden - Systeme, Konzepte, Umsetzung*, 1st ed. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co KG, 2016.

[10] H. Huber, G. Settembrini, A. Primas, and S. Zuber, «Vergleich von Lüftungskonzepten für Wohnbauten,» EnergieSchweiz, Bundeamt für Energie BFE, Bern, 2022.

[11] D. Bionda, G. Settembrini, and S. Doningo, «SYGREN - Systemkennwerte Graue Energie Gebäudetechnik,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2021.

[12] M. Klingler, U. Kasser, D. Savi, A. Primas, Y. Stettler, and P. Gujer, «Ökobilanzdaten für Lüftungs- und Wärmeanlagen - Sach- und Ökobilanzen von sechzehn verschiedenen Gebäuden in den Bereichen Wohnen, Büro, Schulen und Altersheime,» Bern, 2014.

[13] H. Huber, C. Stünzi, C. Sibold, and D.-S. Kunz, «ABLEG - Abluftanlagen in der energetischen Gebäudeerneuerung,» IEBau, FHNW (im Auftrag des BFE), Muttenz, 2018.

[14] V. Dorer and A. Pfeiffer, «Energieeffiziente und bedarfsgerechte Abluftsysteme mit Abwärmenutzung (ENABL), Schlussbericht,» Bundesamt für Energie BFE, Dübendorf, 2002.

[15] C. Hoffmann, A. Geissler, C. Hauri, H. Huber, and A. Primas, «FENLEG: Fensterlüfter in der etappierten Gebäudesanierung - ist der Einsatz erfolgreich?,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2021.

[16] C. Dimitroulopoulou, «Ventilation in European dwellings: A review,» *Build. Environ.*, vol. 47, pp. 109–125, 2012.

[17] O. Böttcher, U. Römmling, C. Kraus, and J. Albers, «Messprogramm und Evaluierung zum energetisch optimierten Neubau des Umweltbundesamtes in Dessau,» Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Berlin, 2009.

[18] E. Heinz, T. Hartmann, and D. Borrmann, *Wohnungslüftung - frei und ventilatorgestützt. Anforderungen, Grundlagen, Massnahmen, Normenanwendung*, 4th ed. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2021.

[19] H. Huber, *Wohnungslüftung - Planung, Ausführung, Betrieb*, 1st ed. Zürich: Faktor Verlag, 2021.

[20] A. Primas, H. Huber, C. Hauri, and M. Näf, «Abluftanlagen und Einzelraumlüftungen im Vollzug Energie,» EnFK Regionalkonferenz Ostschweiz, Horw, 2018.

[21] J. V. S. Berthin, B. Collignan, P. O'Kelly, JL. Savin, «Projet NANGIS – HR-VENT - Rapport final. Mise en oeuvre et mesure des performance d'un systeme de ventilation hygroreglable en renovation avec assistance mecanique tres basse pression.,» Aereco, Marne La vallée Cedex, 2006.

[22] P. Heiselberg (ed.), «IEA-ECB Annex 35: Principles of Hybrid Ventilation,» Hybrid Ventilation Centre, Aalborg University, Aalborg, 2002.

[23] S. Aggerholm, «Hybrid Ventilation and Control Strategies in the A35 Case Studies,» IEA-EBC Annex 35, 2002.

[24] P. O'Sullivan and A. O'Donovan, «IEA-EBC Annex 62 Ventilative Cooling Case Studies,» Aalborg University, Aalborg, 2018.

[25] C. Hauri, A. Primas, and H. Huber, «Küchenabluft bei der energetischen Gebäudesanierung und im Neubau,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2019.

[26] O. Kah, T. Hartmann, C. Knaus, M. Broege, and A. Bruns, «Bewertung von Küchen-Dunstabzugssystemen in energieeffizienten Gebäuden,» *Bauphysik*, vol. 42, no. 1, pp. 34–44, 2020.

[27] M. Hall, «Schwerkraftlüftung – Monitoring Mehrfamilienhaus Eidgenossenweg,» Bundesamt für Energie BFE, Bern, 2023.

EPILOG
Anders Bauen – ZUKUNFT DENKEN

Nachhaltig aufbrechen – Wegweiser Holzbau

Isabell Nemeth
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Miaomiao He
Technische Hochschule Rosenheim
Rosenheim, Deutschland



Nachhaltig aufbrechen – Wegweiser Holzbau

1. Einleitung

Die immer stärker werdenden Zeichen des Klimawandels, zur Neige gehende Ressourcen und die wachsende Umweltverschmutzung haben den dringenden Bedarf zur Umsetzung von Gegenmaßnahmen im Bewusstsein von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft in den letzten Jahren tief verändert. Sowohl international als auch national wurden auf dieser Grundlage die bereits seit Ende der 80er Jahre laufenden Bemühungen um weitreichende Beschlüsse und Maßnahmen ergänzt, um in den nächsten 20 Jahren Klimaneutralität, Ressourcenschonung sowie einen veränderten Umgang mit der Umwelt zu gestalten.

Im Gebäudebereich haben die stetige Anhebung der Anforderungen und die damit initiierte Entwicklung von Innovationen insbesondere im Neubau signifikante Veränderungen im Betriebsenergiebedarf erreicht. In der in Abstimmung befindlichen neuen EU-Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) soll das Null-Emissionsgebäude ab 2030 zum Standard und Vorbild werden.

Im Gegensatz zu den ambitionierten Standards im Neubau bestehen für den Gebäudebestand weiterhin nur wenige Vorgaben. Zwar bieten Förderprogramme wesentliche Unterstützung für die Investitionskosten der Gebäudesanierung, gleichzeitig bleibt die Sanierungsquote der Bestandsgebäude weiterhin hinter den Erwartungen zurück und der Sektor verfehlt nach der Berichterstattung im Klimaschutzbericht 2022 [1] die Ziele zur Emissionsreduktion. Gemäß den Treibhausgas-Projektionen 2024 [2] wird auch für das Jahre 2030 erwartet, dass der Sektor Gebäude die nationalen Emissionsreduktionsziele verfehlt. Die folgende Abbildung zeigt den nur geringen Rückgang der jährlichen Emissionen für Raumwärme und Warmwasser im Zeitraum 2000-2020.

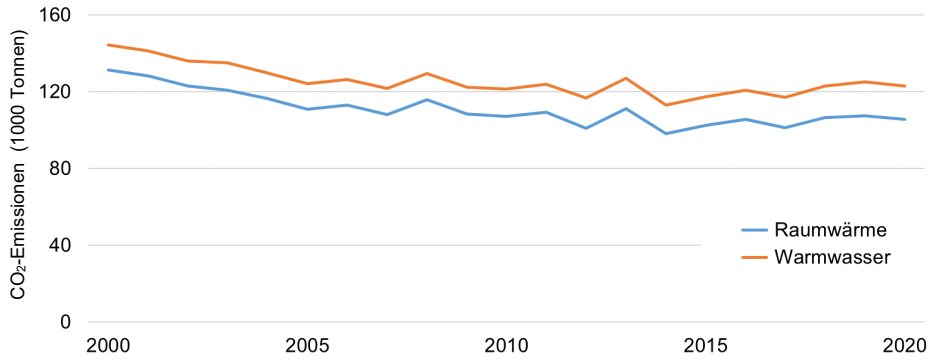


Abbildung 1: Entwicklung der CO_2-Emissionen für Raumwärme und Warmwasser im Sektor Haushalte im Zeitraum 2000-2020 in Deutschland (Quelle: [3], eigene Darstellung)

Noch nicht berücksichtigt sind in der Abbildung die Emissionen, die durch die Herstellung der Baustoffe für den Bau oder die Sanierung anfallen, ebenso wenig wie der Abbau nicht erneuerbarer Ressourcen, die der Bausektor noch immer umfangreich in Anspruch nimmt. Vor dem Hintergrund des für die Umstellung zur Klimaneutralität zur Verfügung stehenden Zeitraums wird deutlich, dass die bereits ergriffenen Maßnahmen noch durch eine Vielzahl an Aktivitäten ergänzt werden müssen.

2. Zukunft denken: Szenarien für den Einblick in mögliche Entwicklungen

Die Anzahl der beteiligten Akteure und technischen Bereiche, das zur Umsetzung der Ziele hohe erforderliche Investitionsvolumen und die starke Abhängigkeit zwischen Amortisationszeiten und künftiger Energiepreisentwicklung deuten die Komplexität an, in der zukünftige Entwicklungen ablaufen. Eine Vorhersage der eintretenden Entwicklung ist auch bei sorgfältiger Planung der Maßnahmenabläufe nicht einfach möglich.

Zur Abbildung der langfristigen Entwicklung bieten sich daher Modelle an, mit deren Hilfe die Auswirkungen verschiedener Parameter in Szenarien dargestellt werden und aus der Systemperspektive verdeutlichen, ob und wo sich Unsicherheiten befinden.

2.1. Modell des bayerischen Gebäudeparks

Um die langfristige Entwicklung des bayerischen Gebäudeparks abzubilden, wurde ein Bottom-up-Modell entwickelt, dessen wesentliche Grundlage die Ergebnisse der Wohnflächenzählung im Jahr 1989 sowie die jährliche bayerische Baufertigstellungsstatistik auf Landkreisebene bildet. Da Veränderungen an den Gebäuden seit dem Herstellungsjahr nicht in den Daten enthalten bzw. verfügbar sind, werden sämtliche Veränderungen über die Standdauer des Gebäudes modelliert. Die Charakterisierung der wärmeübertragenden Hülle erfolgt mithilfe typischer Zusammenhänge zwischen Wohn- und Hüllfläche [5], der deutschen Gebäudetypologie [6] und sowie den Daten der Baufertigstellungsstatistik.

Die technische Lebensdauer dient als Grundlage für die Beschreibung des Ausfallverhaltens der Bauteile in der wärmeübertragenden Hülle und ermöglicht die Entwicklung eines synthetischen Lebenszyklus der einzelnen Gebäude, um eventuelle Sanierungsmaßnahmen den zum jeweiligen Zeitpunkt geltenden Anforderungen zuordnen zu können. Auch die Einschätzung der Austauschzyklen der Wärmeerzeuger in den Gebäuden wird anhand der technischen Lebensdauer vorgenommen. Als Basis für die zukünftige Bautätigkeit der Landkreise wird die regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung [7] genutzt, die Verteilung der Gebäudegröße der Neubauten erfolgt auf der Grundlage von Trends.

Um den heutigen Energiebedarf aller bayerischen Wohngebäude abbilden zu können, werden die Bestandsentwicklung, die Weiterentwicklung des Wärmeschutz aller Gebäude des Bestands sowie die Abrisstätigkeiten, nachgebildet. Die Versagenszeitpunkte im Ausfallverhalten der Bauteile in der wärmeübertragenden Hülle bilden Zeitpunkte, zu denen potenziell eine Sanierung stattfinden kann. Die Anzahl der Gebäude, an deren Hülle eine Verbesserung des Wärmeschutz erfolgt, wird auf der Grundlage von Erhebungen anderer Studien ermittelt [8].

2.2. Ausgangslage 2024: Entwicklung im bayerischen Gebäudebestands bisher

Im bayerischen Wohngebäudebestand bestehen aktuell ca. 60 % der Wohnfläche in Ein- und Zweifamilienhäusern (EFH, ZFH), knapp 40 % der Wohnfläche besteht in Mehrfamilienhäusern. Damit befinden sich in Bayern ca. 5 % mehr Wohnfläche in Gebäuden mit geringerer Kompaktheit als in ganz Deutschland [9].

Auch die Struktur der Wärmeerzeuger unterscheidet sich in Bayern von ganz Deutschland. Während in Deutschland aktuell insgesamt ca. 46,7 % der Wohnungen mit Gas und ca. 23,4 % mit Öl beheizt werden, wird in Bayern in 40,2 % der Wohnungen Gas und in ca. 33,1 % Öl [10]. Die folgende Grafik zeigt das Ergebnis der Modellberechnungen, wie sich der Heizwärmebedarf der unterschiedlichen Baualtersklassen sowie der Endenergiebedarf in Bayern seit 1990 entwickelt hat.

Deutlich erkennbar ist darin, dass der Heizwärmebedarf der älteren Baualtersklassen, sowie der Endenergiebedarf über alle Baualtersklassen, seit Ende der 90er Jahre gesunken ist und sowohl in der Gebäudehülle als auch in der Gebäudetechnik Maßnahmen nennenswert zur Effizienzsteigerung beigetragen haben. Gleichzeitig ist jedoch auch erkennbar, dass ein erheblicher Anteil der Effizienzgewinne vom Wärmebedarf neuer Gebäude aufgebraucht wird.

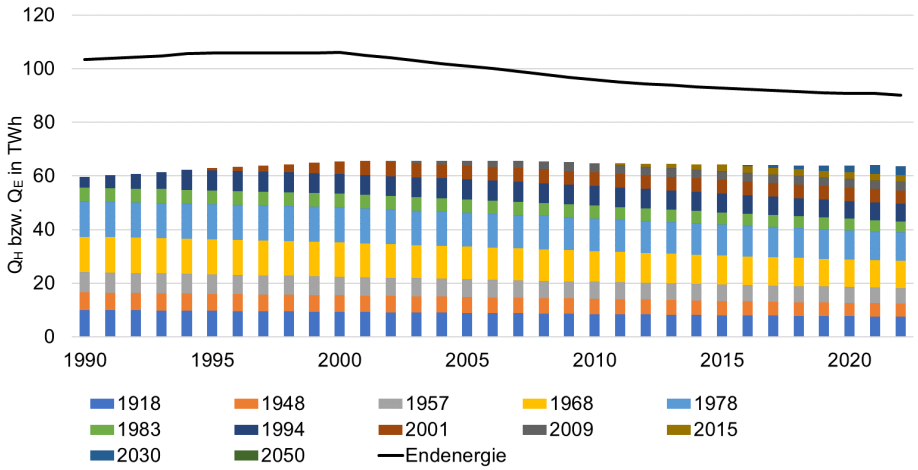


Abbildung 2: Entwicklung des Heizwärmebedarfs nach Baualtersklassen sowie des Endenergiebedarfs der bayerischen Gebäude für Raumwärme und Warmwasser im Zeitraum 1990-2022 (Modellberechnung).

Die Ursachen für die Zunahme der Wohnfläche je Einwohner liegen u.a. in der Veränderung der Haushaltsgrößen, aber auch im steigenden Komfortbedürfnis der Menschen, was, wie folgt abgebildet, zu einem deutlichen Anstieg der Wohnfläche je Einwohner geführt hat und noch immer führt.

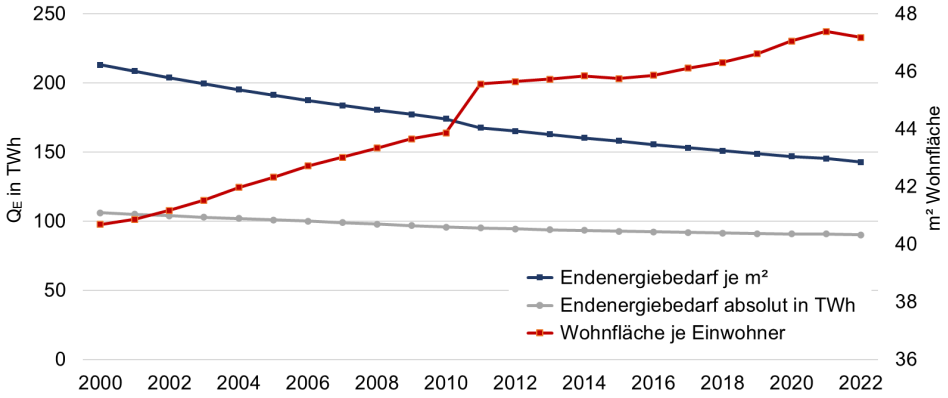


Abbildung 3: Entwicklung des Endenergiebedarfs (Heizung/TWW) je m² bzw.
der Wohnfläche je Einwohner im Zeitraum 2000-2022 in Bayern (Modellberechnung).

Dass damit gerechnet werden muss, dass die Wohnfläche je Einwohner auch in den kommenden Jahren noch weiter ansteigen wird, deutet die aktuelle Diskussion über das große Defizit an Wohnungen in Deutschland an.

2.3. Zukünftige Entwicklung: Fokus Bestandsoptimierung und Wärmewende

Die nachfolgende Grafik beinhaltet das Ergebnis der Modellberechnung zur Entwicklung des Heizwärmebedarfs im bayerischen Wohngebäudebestand bis zum Jahr 2045, wenn die aktuell bestehende Sanierungsquote von ca. 1,0 % bei mäßiger Steigerung des Wärmeschutzstandards als Trend fortgesetzt wird.

Auch in dieser Entwicklung wird die erreichte Energieeinsparung durch den Energiebedarf neu hinzukommender Wohnflächen nahezu wieder aufgefüllt und der absolute Rückgang bleibt weit hinter den Erwartungen zurück. Um die Emissionsminderungsziele des Sektors Gebäude zu erreichen, muss die energetische Gebäudesanierung gravierend gesteigert und mit hoher Wärmeschutzqualität umgesetzt werden.

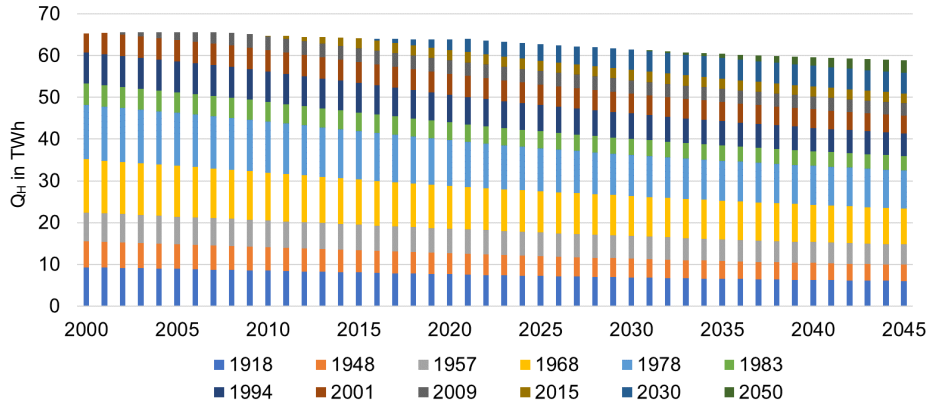


Abbildung 4: Entwicklung des Heizwärmebedarfs der Wohngebäude in Bayern bis zum Jahr 2045, Fortsetzung des heutigen Trends (Modellberechnung).

Mit der nachfolgend dargestellten Altersverteilung der Wärmeerzeuger im Landkreis Ingolstadt (Modellberechnung) wird erkennbar, dass in den nächsten Jahren ca. 45 % der Systeme zum Austausch anstehen und der Höhepunkt der Austauschraten Ende der 2020er Jahre erwartet werden kann. Die in vielen bayerischen Landkreisen ähnliche Altersverteilung zeigt, dass insbesondere mit der anstehenden Austauschwelle (siehe Abbildung 6) grundsätzlich ein hohes Potenzial zum Einbau von Wärmepumpen und damit zur Integration von erneuerbaren Energien in die Wärmeversorgung vieler heute noch fossil beheizter Gebäude besteht.

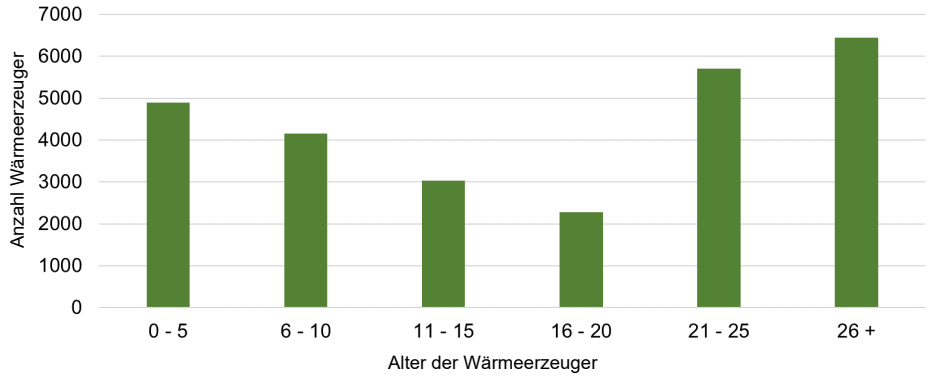


Abbildung 5: Verteilung der im Landkreis Ingolstadt im Jahr 2022 in Wohngebäuden bestehenden Wärmeerzeuger in verschiedene Altersgruppen (Modellberechnung).

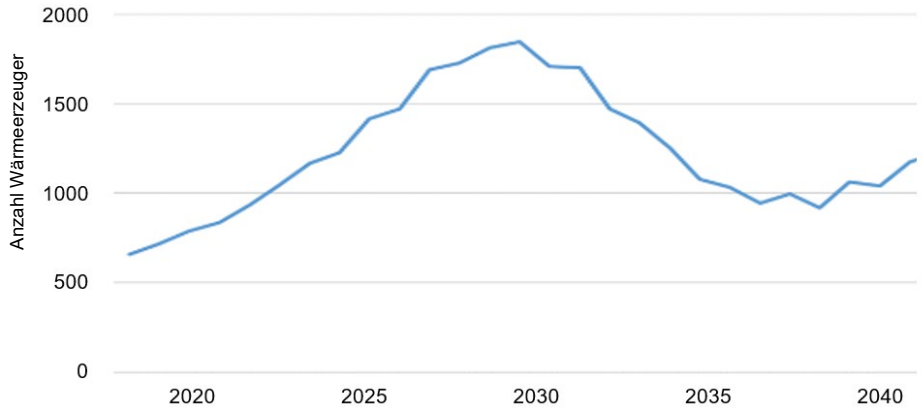


Abbildung 6: Anzahl der zum Austausch anstehenden Wärmeerzeuger im Landkreis Ingolstadt (Modellberechnung).

3. Anders denken: Nachhaltigkeit als Zukunftskonzept

In den zukünftigen Entwicklungen wird erkennbar, dass der Anstieg der Aktivitäten auf den jeweiligen zur Umsetzung angedachten Pfaden mit großen Unsicherheiten behaftet ist und weitere Ansatzpunkte zur Senkung von Emissionen, Ressourcenverbrauch und Umweltwirkungen genutzt werden müssen.
Wertvolle Impulse kann dabei das Konzept der Nachhaltigkeit bieten, mit dessen Hilfe bereits früher Auswege aus Krisen gefunden werden konnten und das in den 80er Jahren durch die Brundtland Kommission als zukunftsfähiger Ansatz wieder in den Blick genommen wurde.
Mit dem Ziel, einen Wald als unerschöpfliches Lager zu nutzen, hat Hans Carl von Carlowitz im 18. Jahrhundert das Konzept der nachhaltenden Nutzung/Pflege als Lösung für das damalige Ressourcenproblem entwickelt und ein vorausschauendes Handeln bei der Verwendung des nachwachsenden Rohstoffs empfohlen: es sollte dem Wald nur so viel Holz entnommen werden, wie dauerhaft nachwachsen kann [12].

Mehr als 200 Jahre nach Hans Carl von Carlowitz hat die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen den grundlegenden Gedanken der Nachhaltigkeit wieder aufgegriffen. Im Ergebnis hat die Kommission unter der Leitung von Gro Harlem Brundtland in ihrem Bericht mit dem Titel «Our Common Future» eine Definition erarbeitet, die das Konzept leicht verständlich und für einen stark erweitertem Rahmen anwendbar werden lässt. Ausgehend von der Begrenzung der Nutzung von Ressourcen auf deren Erneuerungsfähigkeit beschreibt Nachhaltigkeit nach der Brundtland-Kommission eine globale und intertemporale Gerechtigkeit.
Anders als heute an vielen Stellen interpretiert, ist die erfolgreiche Umsetzung nachhaltigen Handelns dabei nicht durch einen Zielpunkt repräsentiert, der durch die Erfüllung vieler einzelner Kriterien nachgewiesen werden kann, auch wenn sich Nachhaltigkeit dadurch messbar und quantifizierbar machen lässt.
Nach der Einschätzung von Felix Eckard bedeutet Nachhaltigkeit einen Zielraum, der durch nachhaltende, also dauerhaft und global praktizierbare Vorgehensweisen repräsentiert wird [4].

3.1. Suche nach der optimalen Lösung

Zukunft Denken bedeutet mit dem Blick auf den von Felix Eckard beschriebenen Zielraum den Umgang mit einer großen Zahl an freien Parametern und möglichen optimalen Lösungen. Nicht wenig herausfordernd ist die Definition von Zielgrößen, mit denen der Zielraum der nachhaltenden, dauerhaft und global praktizierbaren Vorgehensweisen beschrieben werden kann. Bereits auf der Ebene des Systemausschnitts Gebäude lässt sich leicht nachvollziehen, dass die verschiedenen freien Parameter in komplexen und dynamischen Wechselwirkungen und gleichzeitig mit konkurrierenden Zielgrößen bestehen. Während auf Gebäudeebene die Optimierungsaufgabe den Planungsprozess begleitet und gelöst bzw. Zielgrößen durch Bauherren und Rahmenbedingungen und Vorgaben festgelegt werden müssen, ist diese Aufgabe für den Zielraum Nachhaltigkeit nicht umfassend lösbar.

3.2. Wegweiser Holzbau

Um dennoch die Entwicklung in Richtung des Zielraums zu fördern und zu gestalten, bieten die Ansätze, die zur Entwicklung des Konzepts Nachhaltigkeit geführt haben, wertvolle Hinweise. Im Mittelpunkt der Entwicklung stand schon im 18. Jahrhundert der Nutzstoff Holz, dessen vielfältige Anwendungsmöglichkeiten unter den damaligen Bedingungen zu einer Knappheit sowohl an Energie als auch an Baumaterial u.a. für Schiffe geführt hatten. Ursächlich für die aufkommende Rohstoffkrise waren jedoch nicht die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten, sondern vielmehr der unreflektierte Abbau von Wäldern ohne diesen auf die Regenerationsfähigkeit bzw. die Nachwuchskapazitäten zu begrenzen.

Bei der Verwendung von Holz, im Gebäudebereich ist es die Verwendung als Baustoff, weist damit eine zentrale Eigenschaft des Holzes auf ein Prinzip hin, dessen Anwendung grundlegend für eine dauerhaft praktizierbare Vorgehensweise ist: die Entnahme des Rohstoffs mit Beachtung der Regenerationsfähigkeit des Kreislaufs als Voraussetzung für die unbegrenzte Nutzung von Wäldern als Rohstofflager. Holz nachhaltig zu verwenden bedeutet gleichzeitig den Nachwuchs von Holz als Grundlage für weitere Entnahmen zu sichern.

Holz ist damit ein aus der Natur verfügbarer Baustoff, der sich regelmäßig erneuern lässt und ohne den Abbau nicht erneuerbarer Ressourcen zur Verfügung steht. Auch wenn Gesteinskörnungen im Vergleich zum Umfang ihrer Nutzung im Bauwesen scheinbar ebenso unendlich zur Verfügung stehen, besitzen sie nicht die Eigenschaft des Holzes zur natürlichen Erneuerung und müssen daher für eine langfristige Nutzung, je nach Verwendung, zur Rückführung in ihren Ausgangszustand, immer wieder bearbeitet werden. Während Holz in einem biologischen Kreislauf besteht, können nicht erneuerbare Stoffe allenfalls in einem technischen Kreislauf geführt werden, um dauerhaft zur Verfügung zu stehen.
Ein grundlegendes Prinzip für eine nachhaltende, also dauerhaft und global praktizierbare Vorgehensweise bildet damit das Prinzip des Kreislaufs, das bei der Verwendung von Holz als Baustoff bereits aufgrund seiner natürlichen Eigenschaften vorgesehen ist.

Ebenfalls als grundlegendes Prinzip für nachhaltiges Handeln bietet die ausgeglichene Bilanz in der Aufnahme und Abgabe von Kohlenstoff im Lebenszyklus von Holz. Auch wenn zur Verwendung von Holz im Holzbau weitere Prozesse den Einsatz von Energie erfordern, so ist der Energieaufwand deutlich geringer als z.B. für die Herstellung von Beton.
Mit der Aufnahme von CO_2 im Wachstumsprozess ergibt sich im Holzbau eine weitere Möglichkeit zur Unterstützung nachhaltigen Handelns: Bei gezielter Aufforstung um zusätzliche Waldanbauflächen und der Nutzung des Holzes als Baustoff kann CO_2 über einen gewünschten Zeitraum im Holz eingelagert und seine Freisetzung auf einen Zeitpunkt verschoben werden, zu dem die Menge an CO_2 in der Atmosphäre wieder deutlich geringer ist.
Ebenfalls wegweisend für eine nachhaltige Nutzung sind die Möglichkeiten zur Fügung der Holzelemente in Holzbauten, die prinzipiell nach der Nutzungsdauer wieder gelöst werden können. Damit verbunden ist die Möglichkeit, die ausgebauten Holzbauteile in weiteren Bauwerken wieder neu einzusetzen.
Mit den geschilderten positiven Eigenschaften des Baustoffs Holz und des damit verbundenen Holzbaus bietet sich einerseits die Möglichkeit, nachhaltige Vorgehensweisen im Bauwesen zu etablieren. Andererseits liefert der Baustoff und die Bauweise wichtige Impulse wie die Zerlegbarkeit und die Kreislaufführung, mit deren Übertragung auf Vorgehensweisen in der Verwendung anderer Baustoffe wieder Möglichkeiten zur Emissionsreduktion geschaffen werden können.

3.3. Nachhaltig aufbrechen

Einen vielseitig anwendbarer Wegweiser aus dem Holzbau bzw. aus der Verwendung von Holz als Baustoff stellt die Grenze der nachhaltigen Verfügbarkeit des Rohstoffs dar, die gleichzeitig auch auf die Leistungsfähigkeit des Systems bzw. die Grenzen der Ausnutzung hinweist. Übertragen auf das heutige Bauen und die Erwartungen an Gebäude stellt sich die Frage, inwieweit die Nutzer von Gebäuden in Kenntnis bzw. in der Lage oder der Verantwortung sind, die Leistungsfähigkeit der Systeme zu berücksichtigen und im Sinne der Grenzen zu handeln. Sehr deutlich wird eine Diskrepanz, wenn Nutzer von Bürogebäuden im Februar bei der Absenkung der Raumtemperaturen von 24 °C auf 22 °C zu geringe Raumtemperaturen beklagen, während ihre Bekleidung eher auf sommerliche Temperaturen ausgerichtet ist.
Nicht nur unser Energiesystem, unsere Bauweisen und die Art des Wirtschaftens müssen sich verändern, auch Nutzerverhalten oder besser Nutzererwartungen müssen diskutiert und im Kontext der notwendigen Umstellungen angepasst werden. Es muss die Frage erlaubt sein, ob der Nutzer mit der wachsenden Komplexität in technischer Ausstattung davon abgehalten wird, sich angemessen zu verhalten, angemessen im Sinne der zur Verfügung stehenden Ressourcen, oder wie er darauf aufmerksam gemacht werden kann, die Folgen seines Handelns in Entscheidungen einzubeziehen.

Nachhaltig aufzubrechen ist daher doppelt zu verstehen: es soll auf die Notwendigkeit zum Aufbruch in nachhaltige, also dauerhaft und global praktizierbare Vorgehensweisen zeigen und gleichzeitig andeuten, dass zu dieser Umsetzung bestehende Strukturen, Regeln und Vorgehensweisen bzw. Erwartungen aufgebrochen werden müssen um neue Denkweisen und Vorgehensweisen zu ermöglichen. Bereits aktiv sind Initiativen zum Aufbruch, die einen veränderten Umgang mit der Ausstattung von Gebäuden thematisieren und ein Minimum an Technik im Kontext von robusten Gebäuden fordern.
Mit dem Brennstoffemissionshandelsgesetz wurde ein neuer Schritt in die Richtung unternommen, Menschen zu klimafreundlichem Verhalten zu motivieren. Mit steigenden Emissionen in Gebäuden steigen die Kosten für Heizöl, Erdgas, Benzin und Diesel und sollen Anreize für Verbraucher setzen, den Verbrauch zu senken. Zum Ausgleich sozialer Dysbalancen soll das Klimageld die Belastung in einkommensschwachen Haushalten mindern. Die Übertragung des Emissionshandels-Prinzips ist in viele andere Anwendungsfälle denkbar.
Neben der finanziellen Umverteilung gilt es zukünftig auch die Chance zu nutzen, die anstehenden Herausforderungen und auch den möglichen Beitrag von Nutzern oder Akteuren mit hoher Wertigkeit zu kommunizieren und zu fördern. Es muss von Vorteil werden, ein bestehendes Gebäude z.B. in seiner Tragstruktur und damit die bereits investierte graue Energie zu erhalten, ebenso wie z.B. das Bayerische Holzförderprogramm die Einlagerung von CO_2 in Holzbauten über Zuschüsse belohnt und nachhaltiger Bauweisen klar in den Vordergrund rückt.
Wie eingangs beschrieben: es braucht eine Vielzahl an Ideen und Lösungsansätzen, in möglichst vielen Bereichen.

4. Quellen

[1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022): Klimaschutzbericht 2022 der Bundesregierung nach § 10 Absatz 1 des Bundes -Klimaschutzgesetzes. Hg. v. BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Berlin.

[2] Wehnemann, Kai und Schultz, Karlotta (2024): Treibhausgas-Projektionen 2024 – Ergebnisse kompakt. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

[3] Statistisches Bundesamt (Destatis) (2022): Umweltökonomische Gesamtrechnungen - Private Haushalte und Umwelt.

[4] Ekardt, Felix (2011): Theorie der Nachhaltigkeit. Ethische, rechtliche, politische und transformative Zugänge – am Beispiel von Klimawandel, Ressourcenknappheit und Welthandel. 3. Auflage. Leipzig/Berlin.

[5] Loga, Tobias (2005): Kurzverfahren Energieprofil. Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden. Hg. v. Institut für Wohnen und Umwelt. Darmstadt.

[6] Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Hg. v. Institut für Wohnen und Umwelt. Darmstadt.

[7] Bayerisches Landesamt für Statistik (2024): Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung für Bayern bis 2042. Demographisches Profil für den Freistaat Bayern. Bayerisches Landesamt für Statistik.

[8] Diefenbach, Nikolaus; Cischinsky, Holger; Rodenfels, Markus; Clausnitzer, Klaus-Dieter (2010): Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt; Bremer Energie-Institut. Darmstadt, Bremen.

[9] Statistisches Bundesamt (Destatis): Baufertigstellungen im Hochbau, Deutschland, 2001-2022, Wohngebäude. In https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=31121-0001&bypass=true&levelindex=1&levelid=1711925107246#abreadcrumb

[10] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (Hg.) (2023): Wie heizt Deutschland? BDEW-Studie zum Heizungsmarkt.

[11] Grober, Ulrich (2013): Die Entdeckung der Nachhaltigkeit. Kulturgeschichte eines Begriffs. München: Verlag Antje Kunstmann GmbH.

Sponsoren – Aussteller

binderholz



binderholz Bürogebäude Baruth | D



Quartier Prinz-Eugen-Park, München | D



Wohnbau Naturquartier Weissache, Kufstein | AT



Bezirkshauptmannschaft Salzburg-Umgebung, Seekirchen am Wallersee | AT

Komplettanbieter für Massivholzprodukte und innovative Baulösungen

Mit unseren Massivholzprodukten und innovativen Baulösungen werden weltweit Gebäude unterschiedlichster Verwendung durch Kunden und Partnerbetriebe errichtet. Modernste CNC-Technologie ermöglicht jegliche Bearbeitung unserer massiven Holzbauprodukte. Die kompetente binderholz Technikabteilung unterstützt Sie bei der Erarbeitung verschiedenster Gebäudekonzepte und der technischen Planung. Für durchdachte Massivholzbaulösungen beraten Sie unsere Ingenieure mit fundiertem Fachwissen.

Sägeprodukte | Holzbauprodukte: Brettsperrholz BBS, Brettschichtholz, Massivholzplatten, Konstruktionsvollholz | DIY-Produkte | Pressspanpaletten und -klötze | Biobrennstoffe | Pferdestreu

bbs@binderholz.com **www.binderholz.com**



Die ressourcenschonende Stütze für den modernen Holzbau

Die **EGGER EcoBox** zeichnet sich durch einen effizienten und damit ressourcenschonenden Materialeinsatz aus. Im Vergleich zu Massivholz wird durch den effizienten Materialverbund der **EcoBox** der Holzverbrauch gesenkt. Zusätzlich wird Gewicht in der Anwendung eingespart.

Diese Punkte sind essentiell wichtig für moderne und hochautomatisierte Produktionen im Holzbau und die moderne Alternative zu Massivholzstützen in Holzrahmenbauwänden.

Mehr Informationen zu unserer EcoBox finden Sie auf unserer Website.
Einfach QR Code scannen oder direkt über die URL einsteigen: to.egger.link/ecobox

EGGER

MEHR AUS HOLZ.



ISOCELL

WWW.ISOCELL.COM

ISOCELL GmbH & Co KG
Gewerbestraße 9
5202 Neumarkt am Wallersee
Tel: +43 6216 4108-0 | office@isocell.at

TIMBER Protect SK

TIMBER Protect SK ist eine Kombination aus beidseitig mit einer undurchlässigen Membran beschichtetem Vlies und einem speziell darauf abgestimmten Polyacrylkleber. Der reißfeste Kunststoffliner erleichtert die Handhabung. Mit den Breitbahnen können Bauelemente als Schutz beim Transport und während der Bauzeit vollflächig miteinander verklebt werden. Bahnstöße lassen sich problemlos längs entlang des Markierungsrasters und diagonal mit 10 cm Überlappung herstellen. Die Folie kann auch als dauerhafte Luftdichtheitsschicht innerhalb des Bauteils eingesetzt werden.

- **Optimierte Rücktrocknung**
- **Vollflächig selbstklebend**
- **Rutschsicher durch Anti – Slip Beschichtung**
- **Sehr gute Haftung auf sich selbst**
- **Doppelter Funktionsfilm Witterungsschutz**



TRANSPORT SCHUTZ



BAUZEIT SCHUTZ

LUFT DICHTHEITS SCHICHT

Team Holzbau.
Unschlagbar stabil.



Profitieren Sie von den herausragenden statischen Werten der fermacell® Gipsfaserplatte und sparen Sie Zeit und Geld mit einlagiger Beplankung sowie hervorragender Aussteifung, selbst mit weniger Verbindungsmitteln.

Die erfolgreiche Kombination im Team Holzbau: Ihre Fähigkeiten und die fermacell® Gipsfaserplatten

Verlass' Sie Sich drauf
fermacell® Gipsfaserplatten – seit über 50 Jahren das Original im Team Holzbau.

© 2024 James Hardie Europe GmbH. ™ und ® bezeichnen registrierte und eingetragene Marken der James Hardie Technology Limited und James Hardie Europe GmbH.

fermacell® Gipsfaserplatten
www.fermacell.de

fermacell®



INNOVATIVER HOLZBAU MIT SYSTEM

Nachhaltig hochwertig

Knauf bietet ganzheitliche, perfekt aufeinander abgestimmte Lösungen für den Holzbau, die höchste Anforderungen an Schall-, Brand- und Wärmeschutz in Boden, Wand, Decke und Dach erfüllen.

Auf unserem Ausstellungsstand beraten Sie unsere Experten aus Deutschland, Österreich und der Schweiz umfassend zu neuen und bewährten System- und Dämmlösungen von Knauf, Knauf Insulation und Knauf Elements. Dabei stehen folgende Themen im Fokus:

- Außenwand-Systeme für den innovativen und auch mehrgeschossigen Holzbau
- Holzbalkendecken mit außergewöhnlichem Schallschutz – auch im tieffrequenten Bereich
- Wirtschaftliche und effiziente Dämmsysteme
- Funktionsplatten von Knauf zur Gebäudeaussteifung
- Vorgefertigte Elemente

www.knauf.com

KNAUF INSULATION

KNAUF

NEU: Die erste 3-in-1-Dachbahn

+

SOLITEX® QUANTHO

Höchste Hagelwiderstandsklasse HW5

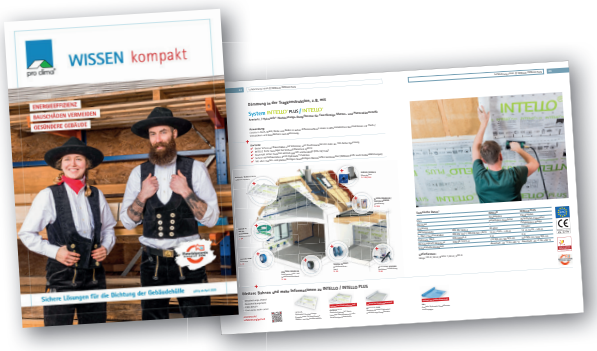
Naht- und perforationssichere Unterdeckung

Regensicheres Unterdach

ETA
CE
European Technical Assessment
ETA-23/0532

HAGELWIDERSTANDSKLASSE
EN 13583
HW5

SOLITEX QUANTHO Muster und aktuelles Planungshandbuch
kostenfrei anfordern unter **proclima.de**



pro clima®


LUFT, WIND ODER REGEN?
KEIN PROBLEM!
Unsere Lösungen schützen
die gesamte Gebäudehülle
rothoblaas
VAPOR ADHESIVE 260
20 cm
Für weitere Informationen:
www.rothoblaas.de
rothoblaas
Solutions for Building Technology

STEICO
Das Naturbausystem

STEICO – das Naturbausystem

Natürlich dämmen und bauen

Ob Holzfaser-Dämmstoffe aus dem Nass- oder aus dem Trockenverfahren. Ob Stegträger oder Furnierschichtholz. STEICO ist Europas größter Hersteller für ökologische Dämm- und Konstruktionsprodukte für das ganze Haus. Profitieren Sie von unserem umfangreichen Sortiment sowie dem hervorragenden Service, den wir als Marktführer bieten.





Aus natürlichem Nadelholz – der Umwelt zuliebe





Richtig wohngesund und geprüft





Spart CO_2
Speichert CO_2
STEICO HOLZFASER

www.steico.com

LIGNATUR®



Alles in einem Element:

- Statik - tragend
- Feuerwiderstand 90 min
- Ästhetik
- Ökologie
- Schallschutz
- Raumakustik
- Wärmeschutz
- Top-Beratung

Interessiert?

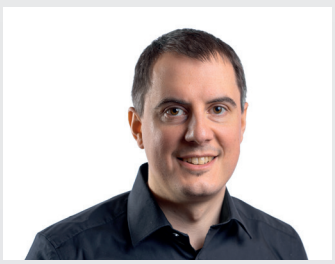
Kontaktieren Sie unser Beratungsteam:

+41 71 353 04 10
beratung@lignatur.ch







Erfahren Sie mehr unter: www.lignatur.ch



best wood **CLT BOX – DECKE FS**

DAS DECKENSYSTEM FÜR DEN MEHRGESCHOSSIGEN HOLZBAU

» **erhöhter Schallschutz auch im tieffrequenten Bereich**
» **Brandschutz bis F 90 / REI 90**
» **große Spannweiten** möglich
» **Ressourcenschonend:** bis zu 40 % Materialeinsparung

---

best wood **INGENIEURBÜRO**

» unterstützt Sie bei der Planung und erstellt für Sie Brandschutz-, Schallschutz- und Statiknachweise

Hier gehts direkt zur CLT BOX – DECKE FS

best wood® SCHNEIDER

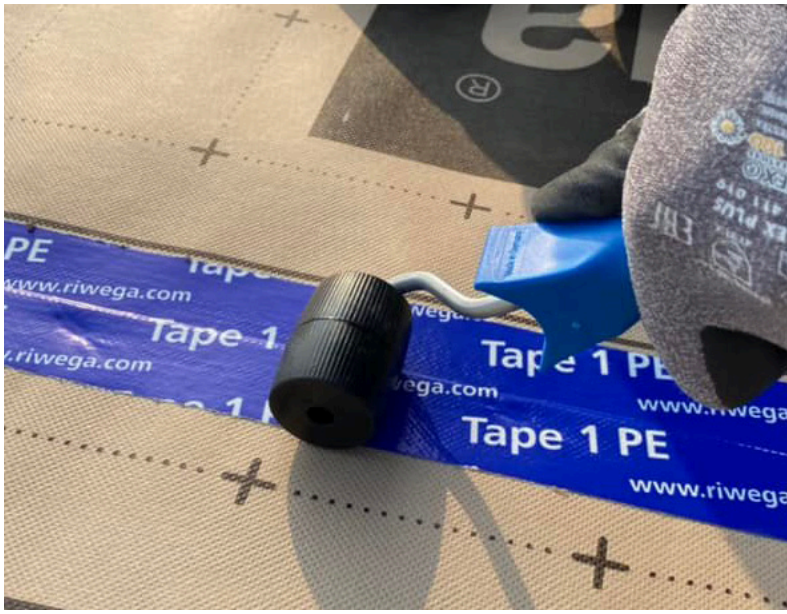
www.schneider-holz.com


isofloc®
Einfach perfekt dämmen
Hochhinaus.
Nachhaltig
mit jeder Faser.
Regional verwurzelt. Nachhaltig. Innovativ.

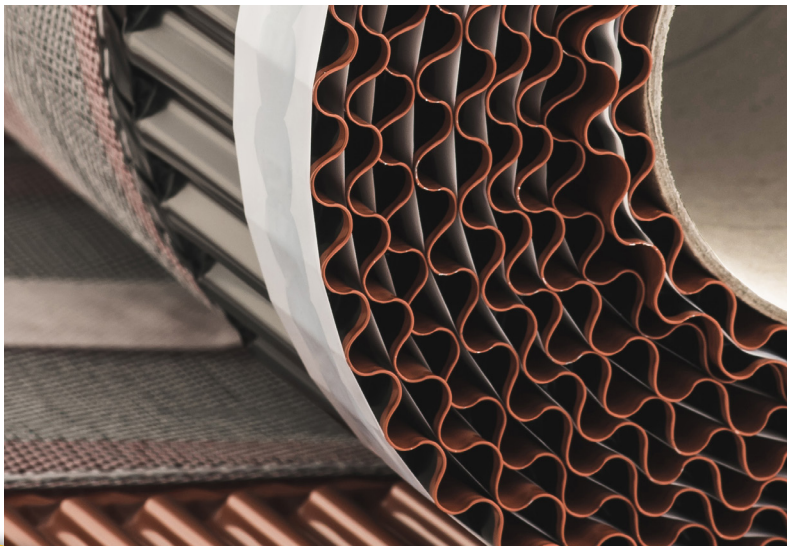
Riwega®

Das Beste für **Dach und Wand**!









member of Ergepearl group

isover SAINT-GOBAIN

rigips SAINT-GOBAIN



Dein starker Partner im Holzbau
SAINT-GOBAIN
kompetent
verlässlich
nachhaltig

Besser im System: **ULTIMATE und Rigidur® Gipsfaserplatten – zwei starke Partner.**

Für optimal kombinierten Wärme-, Schall- und Brandschutz in schlanken Konstruktionen auch bei hohen mechanischen und optischen Anforderungen.

www.isover.de/holzbau

www.rigips.de/holzbau

SAINT-GOBAIN





NEU

Wetguard: Transparente Feuchteschutz-Membrane von SIGA

SIGA Wetguard ist die neue vollflächig selbstklebende Feuchteschutz-Membrane und kann bereits werkseitig, in der Vorfertigung, oder auf der Baustelle montiert werden.

SIGA Wetguard 200 SA schützt vorgefertigte Holzelemente zuverlässig vor Feuchtigkeit und Beschädigungen während Lagerung, Transport, Montage und der Bauphase und verhindert damit Feuchteschäden wie Verfärbungen im Sichtbereich oder Spannungen und Massungenauigkeiten durch Aufquellen der Elemente.

Über Wetguard

SIGA Wetguard ist diffusionsfähig und mit einer rutschfesten und wasserdichten Spezialbeschichtung ausgerüstet. Das robuste Vlies schütz vor mechanischer Beschädigung und der vollflächig aufgebrachte SIGA-Hochleistungsklebstoff sorgt für sichere Haftung auf Holzoberflächen. Mit der transparenten Optik von SIGA Wetguard bleiben nicht nur im Werk angebrachte Markierungen oder Durchdringungen sichtbar, sondern auch die charakteristische Oberflächenstruktur des Werkstoffes Holz.

Die Folie ist robust gegenüber mechanischer Belastung und auch bei Nässe rutschfest. Der formstabile Träger ermöglicht einfaches, schnelles und faltenfreies Verlegen und ist sofort dicht verklebt. SIGA Wetguard ist in drei Produktdimensionen (1560mm / 780mm / 390mm x 50m) erhältlich. Für spezielle Anwendungen können nach Kundenwunsch verschiedene Dimensionen und Ausführungen hergestellt werden.

SIGA Wetguard sorgt für maximale Sicherheit über den gesamten Bauablauf und erspart dem Handwerker zusätzliche Arbeitsschritte und Zeit. Damit ist sie die ideale Abdichtung während der Bauzeit, ob für einfache oder herausfordernde Holzbauprojekte.

AIR FIRE TECH

Brandschutzlösungen
für Haustechnik in Brettsperrholz
Unsere 3 Konzepte



Konzept 1
Einzelabschottungen
Single penetration seals



Konzept 2
Kombiabschottungen
Mixed penetration seals



Konzept 3
Abschottungen in Schachtwänden
Penetration seals in shaft walls

Scannen und mehr entdecken!



AIR FIRE TECH ist spezialisiert auf Abschottungen in Brettsperrholzkonstruktionen für haustechnische Installationen. Von Sanitär und Heizung über Lüftung bis zu Elektro.

www.airfiretech.at


DAS BESTE HOTEL DER STADT.
ABER LEIDER DER
ZWEITBESTE BRANDSCHUTZ.
Alles vom Feinsten, dafür beim baulichen Brandschutz in der Haustechnik gespart? Eine Rechnung, die im Ernstfall nie aufgeht, weil solche Entscheidungen richtig teuer werden können. Entscheiden Sie sich lieber für den erstklassigen Conlit Brandschutz mit nichtbrennbaren Steinwolle-Dämmstoffen von ROCKWOOL: Schmelzpunkt > 1000 °C, Feuerwiderstand bis zu 120 Minuten.
Übernehmen Sie beim Brandschutz die 1000°C-Verantwortung!
ROCKWOOL
www.rockwool.de
> 1000 °C


DHV
Deutscher
Holzfertigbau-
Verband e.V.
Bauen
mit Holz:
Gemeinsam
MEHR erreichen.
▶ Werden Sie jetzt
Mitglied im DHV
www.d-h-v.de

Eurotec®

Der Spezialist für Befestigungstechnik

UNSER EUROTEC
BIM-PORTAL
Alle Daten auf einen Blick!



DAS EUROTEC BIM-PORTAL FÜR IHRE BAUPLANUNG!

Building Information Modeling ist aus dem modernen Planungsalltag nicht mehr wegzudenken. Auf unserer benutzerfreundlichen Plattform finden Sie Produktinformationen als **BIM-fähige Daten** für Ihr Bauvorhaben. Zu den vielseitigen Dateiformaten zählen unter anderem 3D-/CAD-Objekte, DWG- und PDF-Dateien sowie Hinweise zu unseren **ETA-Zertifizierungen.**



Jetzt planen bim.eurotec.team

Fixpod

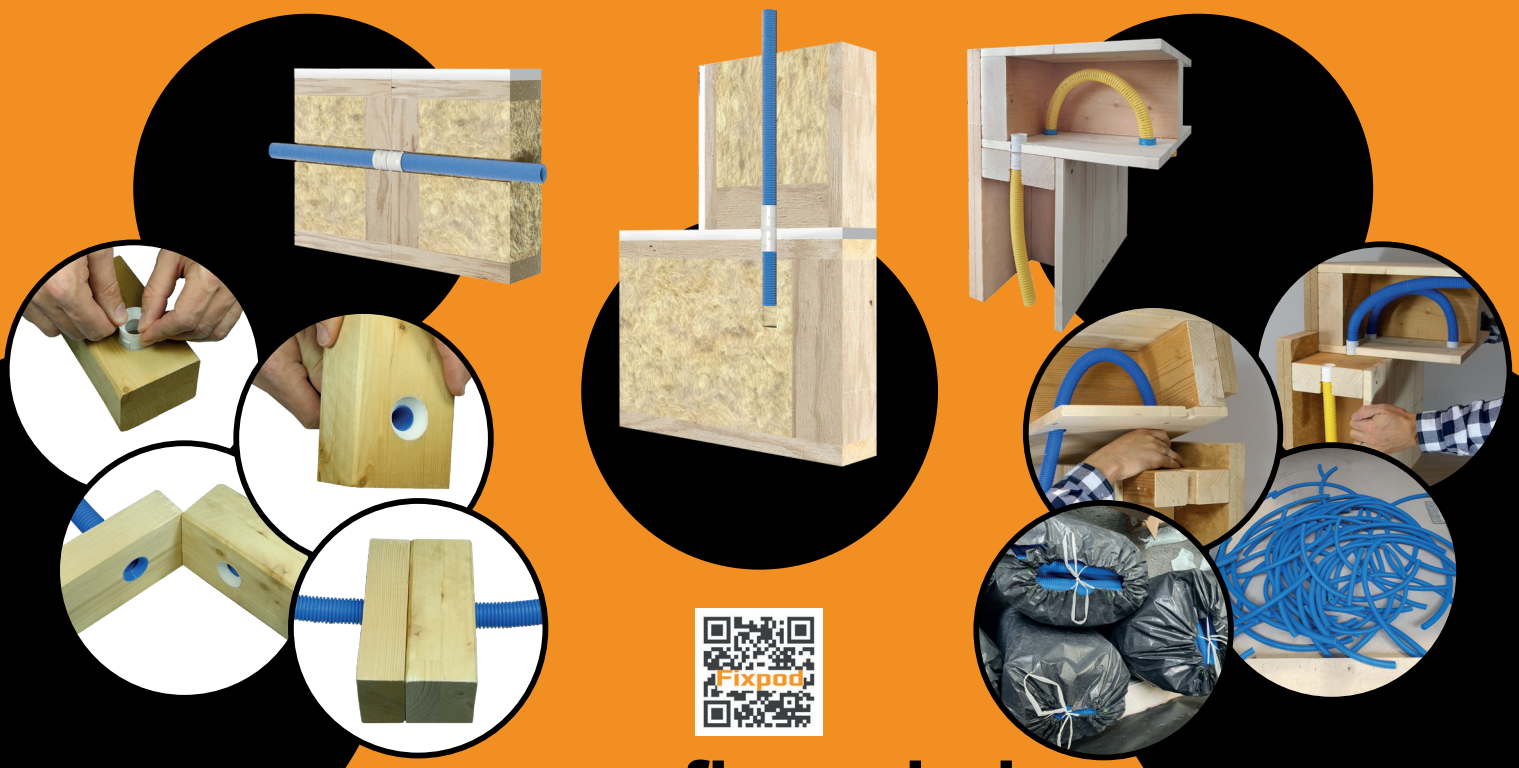
Die innovative Installationslösung für den Holzbau





Die Vorteile auf einen Blick

• Effizientere Prozesse • Arbeitssicherheit • Nachhaltigkeit



www.fixpod.ch

Fixpod GmbH - Randstrasse 3 - CH-8261 Hemishofen

Gaulhofer

Fenster zum Wohnfühlen

FENSTER DIE SINN MACHEN

Zukunfts-Aussichten ökologisch denken

Wir von Gaulhofer wollen Fenster und Haustüren nach höchsten ökologischen Anforderungen fertigen – dafür gehen wir jeden Tag einen Schritt weiter.

Unser jüngstes Werk in Sachen Nachhaltigkeit und „zurück zur Natur“ ist die „Wilde Sortierung“ bei der Holzart Astfichte. Hier wird der Wald eindrucksvoll spürbar – mit Hölzern aus der Region und ressourcenschonender Produktion.

QUALITÄTS FENSTER
MADE IN AUSTRIA

GERMAN DESIGN AWARD WINNER 2023

www.gaulhofer.com



GUTEX

THERMOWALL-L

SCHWÄRMEN

STATT SCHWITZEN

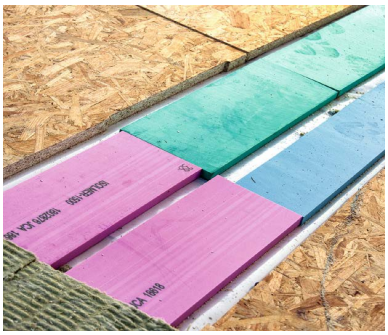


Seit 1932 entwickelt und fertigt GUTEX ökologische Holzfaserdämmstoffe „made in Germany“. Wir machen das Beste aus Holz – und sind damit zum Vorreiter für Holzfaserdämmung in Europa geworden. Unsere Produkte und Systeme setzen Maßstäbe in puncto Innovation, Qualität und Nachhaltigkeit. Und sie ermöglichen ein behagliches, wohngesundes Raumklima – und geben Ihnen das gute Gefühl, das Richtige zu tun.

GUTEX Holzfaserplattenwerk H. Henselmann GmbH + Co. KG
Gutenburg 5, 79761 Waldshut-Tiengen, Telefon +49 7741 6099-0,
info@gutex.de, www.gutex.de

Solutions against vibrations, shocks and structure-borne noises in timber constructions





Solutions

– Decoupling of flank noise
– Spring bearings for HVAC systems and machines
– Elastic bearings for elements and modules

HBT-ISOL AG
Im Stetterfeld 3
CH-5608 Stetten
T +41 56 648 41 11
www.hbt-isol.com
info@hbt-isol.com

HBT-ISOL GmbH
Friedrichstr. 95
D-10117 Berlin
T +49 (0)30-97 89 47 07
www.hbt-isol.com
info@hbt-isol.com

STUDIOLINE Plus

Design trifft auf Funktion

Raumklang QNG-konform verbessern

- Schallabsorption
- Wärmedämmung
- Ballwurf-Zertifizierung
- bauaufsichtliche Zulassung

VOC zertifiziert

Brandverhalten: Klasse E



Einfache Montage

durch Nut + Feder System
(Klammerverlegung)

Wartungsfreie Holzfassaden für individuelle Architektur





NATURNah
LADENBURGER · HEIMISCHES HOLZ



Zur Walkmühle 1-5
73441 Bopfingen-Aufhausen
Tel. + 49 7362 9605-0
Fax + 49 7362 9605-20
E-Mail: info@ladenburger.de

Freie Flur 3 I Am Bahnhof
04643 Geithain
Tel. + 49 34341 306-0
Fax + 49 34341 306-80
E-Mail: geithain@ladenburger.de

www.ladenburger.de

Holzwerke Ladenburger

Elektro-Installation in Massivholzwänden **Effizient und sicher -** dank zertifiziertem Brandschutz

Stand **20** Besuchen Sie uns!





F30-B - F120-B

Der neue Standard für den Einbau in Massivholzwänden. Ideal für Sichtholz-Qualität!

Geräte-Verbindungsdose für Massivholz

- Klemmrippenbefestigung für die Montage in Brettsperrholz- bzw. Brettschichtholzwänden oder in Massivholzplatten
- Innovative, seitlich am Dosenumfang positionierte Leitungseinführungen

Geräte-Verbindungsdose PROTECT®

- Für Massivholzelemente F30-B bis F120-B
- Erhält die Schallschutzeigenschaft der Massivholzelemente
- Auch für den direkt gegenüberliegenden Einbau

Entdecken Sie auch unsere neuen **Wand- und Deckenübergänge 90°**



KAI0424fhb

KAISER

www.kaiser-elektro.de

LEIDORF
HOLZBAU

EIN VOLLES BRETT AN LEISTUNGEN



CLT

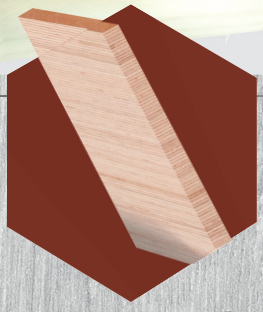
CLT BESCHAFFUNG
MIT KURZER LIEFERZEIT

HOLZBAU PLANUNG

HIGH-TECH ROBOTER ABBUND

EINBAU VON
FENSTERN, GIPSKARTONPLATTEN,
DÄMMUNG, ... IM WERK

LIEFERUNG MIT EIGENEN LKW'S
AUF DIE BAUSTELLE



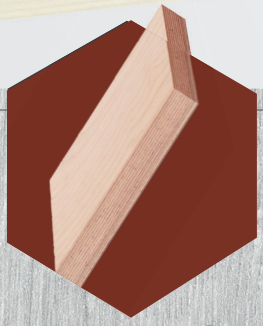
KERTO

WIR SIND PREMIUM-HÄNDLER
FÜR ÖSTERREICH UND
SÜDDEUTSCHLAND

LAGERFORMAT: 2,5 X 13,5 M

ABBUND AUCH GROSSFORMATIGER
PLATTEN

> 3.600 M² KERTO | LVL LAGERND



BAUBUCHE

WIR BEARBEITEN UND
LIEFERN BAUBUCHE
FÜR IHR PROJEKT

INTERESSIERT?

UNVERBINDLICH ANFRAGEN:

office@leidorf.com

+43 7723 43 01 7

www.leidorf.com

Materialeffizient und konfigurierbar

Decken-, Dach- und Wandbauteile sowie Akustikpaneele aus LIGNO® Brettsperrholz-Rippenelementen

30 Jahre Materialeffizienz







Tragfähigkeit

Variable Steghöhen für Spannweiten bis 18 m, Statik mit Schwingungsnachweis

Sichtoberflächen

Echtholz-Oberlächen – geschlossen und in verschiedenen Profilierungen

Schallschutz / Wärmeschutz

Erhöhter Schallschutz – auch tieffrequent, integrierte Wärmedämmung

Brandschutz

Feuerwiderstand bis REI 90, Entflammbarkeit bis B-s1-d0

Raumakustik

Integrierter Akustikabsorber aus natürlicher Holzfaser

Installationen

Ober- und unterseitige Leitungsführung: längs und/oder quer

Baubiologie

natureplus®-zertifizierte gesundheitliche Unbedenklichkeit

LIGNO TREND®

Für eine nachhaltige Holz-Baukultur.

Steinbachstr. 41 | 79809 Weilheim | Deutschland
Tel.: +49 (0) 7755 - 9200-0
E-Mail: info@lignotrend.com

Konfigurieren Sie das individuelle Element für Ihr Projekt selbst:
www.lignotrend.com/konfigurator

XL3

Schallpegelmesser
Klasse 1

Raum- & Bauakustik

Luft- und Trittschalldämmung mit Auswertung im Gerät

Terz- und Oktavspektrum

Deutsche Bedienoberfläche



NTi Audio GmbH · Essen, Deutschland
+49 201 6470 1900 · de@nti-audio.com

www.nti-audio.com

DAS DACH ALS ERLEBNISRAUM

DARUNTER RUHE.





REGUPOL sound and drain 22

Trittschalldämmung Außenfläche

Messergebnis:

$L_{n,w}$ ($C_{I,50\text{-}2500}$) = 41 (+3) dB

Cradle to Cradle Certified® ist eine eingetragene Marke des Cradle to Cradle Product Innovation Institute (C2CPII). **REGUPOL sound and drain 22** ist gemäß Cradle to Cradle Certified® in Bronze-Level zertifiziert.

akustik@regupol.de | www.regupol.de

REGUPOL

WWW.REX-INDUSTRIE-PRODUKTE.DE

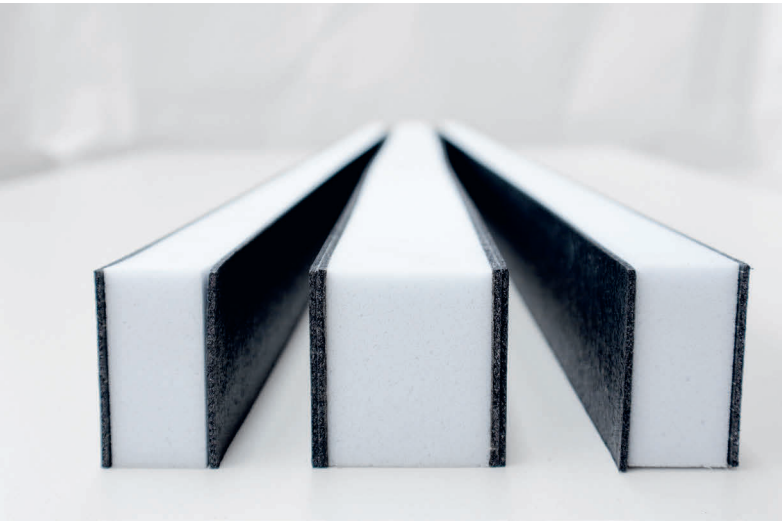
Brandschutz-Fugenfüllsysteme

für Holz- und Hybridbau

Jetzt Broschüre herunterladen



Erfahren Sie mehr im **Theodor-Kober-Saal - Stand 29**





REXPANDIT

EI 90 Dehn- & Scherfuge

- Dehn- und Bewegungsfugen von 10 bis 30mm und 20 bis 40mm
- An Wänden und Decken
- Für Holzbau an Holzbau oder Holzbau an Massivbau
- Scherbewegung bis 25mm
- Geprüfter Fugenschallschutz

FLATON-FLEX A

EI 90 Fuge

- Fugenbreite bis 10mm bei Holzbau an Holzbau
- Fugenbreite bis 5mm bei Holzbau an Massivbau
- Fugenbreite bis 5mm bei Decken-Wandanschluss

Gerexte Fugen Brandschutz auf höchstem Niveau

WIR MACHEN
SCHALL SICHTBAR



sevenbel
EFFECTIVE SOUND IMAGING

Seven Bel GmbH
Hafenstraße 47-51
A-4020 Linz

Tel.: +43 664 204 2710
E-Mail: info@sevenbel.com
www.sevenbel.com

DIE FÜHRENDE TECHNOLOGIE BEI STANDARDISIERTEN HOLZVERBINDER-SYSTEMEN

Unsere Neuigkeiten

Einzigartige **Lösungen**



SONUS

Weltneuheit – Wenn Schallschutz, dann richtig!
SHERPA steht für die führende Technologie bei standardisierten Holzverbinder-Systemen. Diesem Anspruch wird auch der neue Schallschutzwinkel SONUS gerecht.
Der Winkel revolutioniert die Verbindungstechnik im Holzbau in puncto Schallschutz und steht in zwei Verbindergrößen zur Auswahl.

Vorteile:

- Optimaler Schallschutz
- Hohe Tragfähigkeit
- Geprüftes System
- Einfache Montage
- Top Schallentkopplung



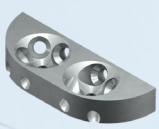
DER NEUE BEMESSUNGS-GUIDE

Planung leicht gemacht!

Der SHERPA Bemessungs-Guide ist ab sofort zum Download verfügbar! Dieser kompakte Leitfaden bietet Ihnen alle relevanten Zahlen und Fakten zusammengefasst, um die einfache Bemessung aller SHERPA-Produkte zu ermöglichen.
Darüber hinaus finden Sie ab Seite 24 einen Schwerpunkt zum Thema Schallschutz, der Informationen von Bi-Trabezlager über Regufoam bis hin zum richtigen Schallschutzlager umfasst.

Direkt downloaden!

UNSER WEITERES SORTIMENT


CLT-Connector


Connector


Power Base


EFcon

SHERPA Connection Systems GmbH
Badl 31, A-8130 Frohnleiten

Service: +43 3127 41 983 - 0
Technical support: +43 3127 41 983 - 311

office@sherpa-connector.com
www.sherpa-connector.com

SOLARLUX

Glasfassaden als Beitrag zum konstruktiven Holzschutz

Nachhaltige Konzepte für Neubau und Sanierung

Ob zum Schutz der Holzfassade vor Witterungseinflüssen, zusätzlicher Wärmeschutz für eine energieeffiziente Gebäudehülle oder zum Schallschutz in städtischen Neubauten – die Proline T ist der neue Allrounder für eine flexible Fassadenverglasung.



Fassadenkonzepte · Schiebefenster · Glas-Faltwände · Terrassendächer · Wintergärten

solarlux.com



Energieberatung | Fördermittel | Gebäudetechnik | Architektur

Fördergelder 2024

Rechtzeitig informieren und Zuschuss sichern

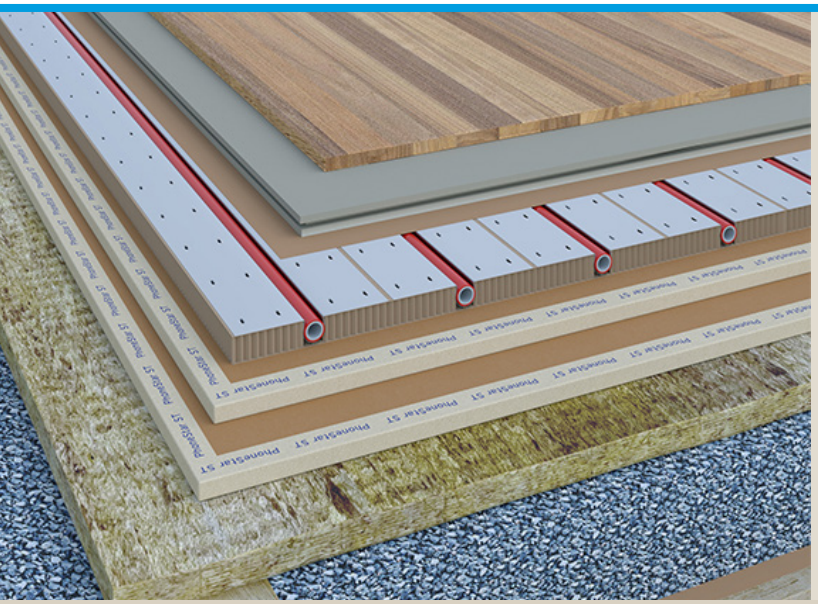
Besuchen Sie uns auf unserem Stand!

TK Baupartner GmbH
Marktplatz 12
73525 Schwäbisch Gmünd

www.tk-baupartner.com
info@tk-baupartner.com
+49 (0) 7171 / 935 961 - 0

WOLF® Bavaria

SCHALLDÄMMUNG FLÄCHENHEIZUNG TROCKENESTRICH



PhoneStar Schalldämmplatten

PowerFloor Fußbodenheizung

PhoneStrip Entkopplungsstreifen

Spezialprodukte Messtechnik

TROCKENE SYSTEMLÖSUNGEN

für Boden, Wand und Decke - bei Neubau (Massiv / Holz) und Sanierung

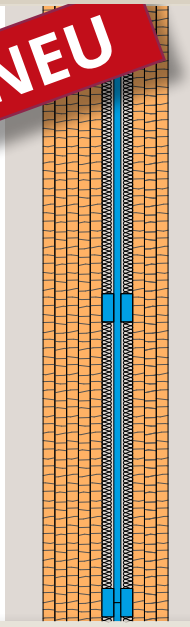
20 JAHRE

Serielles Bauen ohne Kompromisse

DIE „ONE-BLOCK“ und „ONE-BLOCK CLT“ Wohnungstrennwand

- ✓ höchst schalldämmend
- ✓ stapelbar
- ✓ Werksmontage möglich
- ✓ rückbaubar
- ✓ ausgezeichnet

NEU







✓ innovativ ✓ ökologisch ✓ regional

Wolf Bavaria GmbH - ist seit 2004 ein erfolgreiches, innovatives und expandierendes Unternehmen welches Systemlösungen für den Holz- , Massiv- und Trockenbau anbietet.
Der Gedanke eines nachhaltigen, kontinuierlichen Wertstoffkreislaufs zurück zum Ursprung ist in unserer Firmenphilosophie tief verankert und bestimmt unser Handeln auf allen Ebenen. Dabei bildet die Verwendung von nachhaltigen Rohstoffen regionaler Herkunft sowie die Entwicklung rückbaubarer Systeme die Grundlage all unserer Aktivitäten.

Wolf Bavaria GmbH
Gutenbergstraße 8
91560 Heilsbronn
Germany

Kontakt
Tel.: +49 (0) 9872 953 98 0
Fax: +49 (0) 9872 953 98 - 11
Email: info@wolf-bavaria.com

www.wolf-bavaria.com

Vertrieb FORUM **HOLZBAU**
Bahnhofplatz 1, 2502 Biel/Bienne, Schweiz
T +41 32 372 20 00
info@forum-holzbau.com, www.forum-holzbau.com

ISBN 978-3-906226-62-0