

Einführung in redundante Tragwerke Beispiel Balken- und Fachwerkroste

U. Prof. Michael Flach
Universität Innsbruck
Innsbruck, Österreich



Einführung in redundante Tragwerke Beispiel Balken- und Fachwerkroste

1. Einführung

Redundanz oder redundant bedeutet nach dem lateinischen Begriff «redundantia» Überfluss und bezeichnet im technischen Sinn die Fähigkeit von Tragwerken im Grenzzustand zusätzliche Tragreserven zu mobilisieren. Es handelt sich dabei keineswegs um etwas Überflüssiges oder Verschwenderisches, sondern um die Fähigkeit im Notfall, insbesondere im Versagensfall, die Tragfähigkeit eines einzelnen Trägers zu erhöhen indem er einen Teil der Lasten an benachbarte Träger überträgt, um sich die Tragfähigkeit des Gesamtsystems zu Nutze zu machen. Ähnlich wie ein gesellschaftliches Sozialsystem unterstützen die stärkeren Einzelbestandteile einer Gruppe die Schwächeren und sorgen im Notfall für zusätzliche Sicherheit. Es handelt sich um ein Grundprinzip der Natur, das es insbesondere den Bäumen erlaubt hat über Hunderte Millionen von Jahren Existenzbedrohungen zu überstehen. Ohne diese Fähigkeit Gefahren kollektiv zu begegnen wären die Bäume heute vermutlich ausgestorben. Ähnlich verhält es sich für die Menschheit im Angesicht des Klimawandels: gemeinsam sind die Chancen höher die bevorstehenden Herausforderungen zu bewältigen.

Als einfaches Beispiel aus der Tragwerklehre verfügen statisch bestimmte Einfeldträger über kein redundantes Tragwerksverhalten. Sie sind im Versagensfall auf sich alleine angewiesen und tragen nur so viel wie es ihre individuelle Tragfähigkeit erlaubt. Ihr Versagen erfolgt, von kleineren Umlagerungen der Spannungen im Versagensquerschnitt abgesehen, ohne Vorankündigung. Als Beispiel für redundante Tragsysteme möchte ich hier Trägerroste vorstellen, die im Gegensatz zu einachsigen Einzelträgern, Lasten in zwei Richtungen abtragen und somit eine Verknüpfung von unterschiedlichen Trägern schaffen.

2. Olympischen Sommerspiele in Paris 2024

Aktueller Anlass dieser Themenwahl in Bezug auf weitgespannte Tragsysteme ist für mich die anstehende Sommerolympiade in Paris 2024. Weiträumige Dachtragwerke überspannen Tribünen für Tausende von Zuschauern, so dass man sich zumindest die Frage stellen sollte, welche Folgen die Wahl eines Tragwerks auf die Sicherheit bei Menschenansammlungen haben könnte. Was passiert, wenn ein einachsig gespannter Träger versagt und unwiderruflich auf die darunter sitzenden Zuschauer stürzt? Wie könnte man das Versagen eines Einzelträgers abfedern, um zumindest ein vorangekündigtes Systemversagen mit deutlich höheren Tragreserven zu fördern, so dass Zeit bleibt Zuschauer rechtzeitig zu evakuieren? Abgesehen von Tragreserven handelt es sich aber auch um die Effizienz von Holzbauten, wenn es darum geht ressourcenschonend zu bauen. Einfache Konstruktionen aus massiven Einfeldträgern mögen hinsichtlich Planung und Montage gegenüber Raumtragwerken kostengünstiger sein, aber sie verbrauchen mehr Ressourcen und dies in einer Zeit, wo auch der Holzbau angesichts des wachsenden Schadholzanteils bei der Holzernte mit der Verknappung seiner Vorräte kämpft. Davon abgesehen führen lineare einachsige Tragsysteme zu Unverträglichkeitsproblemen zwischen Randträgern und Giebelwänden: Die Verbindung von Bauteilen mit stark unterschiedlichen Steifigkeiten erfordert aufwendige Lösungen mit Gleitlagern, die langfristig störungsanfällig sind und die Luftdichtheit von Gebäuden reduzieren.

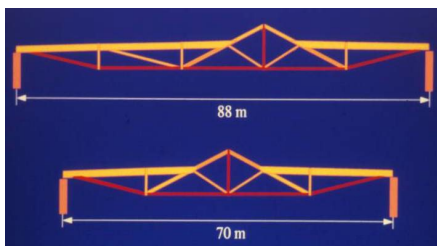


Abbildung 1: St. Gratien Eaubonne, Aufriss zweier sich kreuzender Hauptträger

Als alternativer Lösungsansatz zu einachsigen Tragsystemen sei hier die Indoor-Leichtathletik Halle in St. Gratien Eaubonne, F vorgestellt, die 1996 mit dem European Glulam ausgezeichnet wurde. Sie soll während der olympischen Spiele 2024 in Paris als Trainingszentrum benützt werden. Das 6500 m² große Dach wird von einem Fachwerkrost getragen, das zweiachsig orthogonal ausgerichtet und diagonal bis zu 88 m weit gespannt ist. Die einzelnen Träger des Holz-Stahl-Fach-werks folgen im Aufriss einer Geometrie, die der Eigen- bzw. der Minimalform eines unterspannten Einfeldträgers mit Einzellasten entspricht, so dass eine Biegemomentenbelastung der Ober- und Untergurte weitgehend vermieden wird.

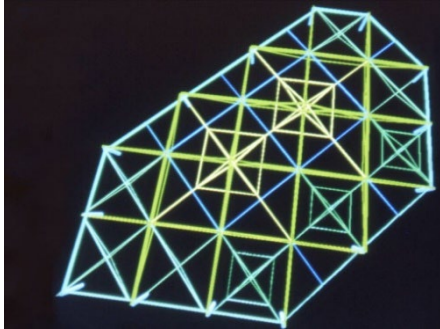


Abbildung 2: Grundriss des diagonalen Haupt- (gelb) und Sekundärtragwerks (blau)

Die Verknüpfung der gekreuzten Trägerscharen erfolgt in den Knotenpunkten zwischen den Gurten mit reinen Zug- (in Stahl) und Druckanschlüssen (in Holz). Somit können alle Knotenlasten, die durch das ebenfalls zweiachsig gespannte Sekundärtragwerk übertragen werden, in zwei orthogonale Richtungen abgeleitet werden. Die Verteilung der Lasten erfolgt in Abhängig der Steifigkeiten und der jeweiligen Tragfähigkeit der Trägerscharen. Die Lichtpyramiden wurden so in das Tragwerk integriert, dass sie in Feld-mitte eine zusätzliche statische Höhe beisteuern. Die Verträglichkeit der Verformungen zwischen dem Tragwerk und den Fassaden ist durch die räumliche Verteilung der Lasten gewährleistet.



Abbildung 3: Innenansicht mit den Tribünen der Indoor-Leichtathletikhalle in Saint Gratien Eaubonne, F 1995
Architekten: Gouget, Villette und Banasevic, Ingenieure ; ICS-BOIS Sarl Flach & Natterer associés

3. Trägerroste SMART TIMBER GRID

Ein weiterer Anlass Trägerroste vorzustellen war das jüngste Forschungsprojekt der Universität Innsbruck mit dem Titel «smart timber grid». Es handelt sich um Trägerroste aus gekreuzt gestapelten Balkenlagen für die Überdachung von Parkplätzen. Das vor kurzem genehmigte und gestartete Projekt verfolgt drei Zielrichtungen:

- Die Erhöhung der Effizienz bzw. der Tragfähigkeit von Tragwerken in Holz mit Hilfe von Redundanz um Lasten auf zwei Wegen zu den Auflagern zu leiten.
- Die Förderung der Wertschöpfung von klein- und mittelständigen Betrieben durch die verstärkte Nutzung von kleinen Massivholzquerschnitten aus lokalem Holz.
- Entwicklung von nachhaltigen und kostengünstigen Tragwerken für die Überdachung von Parkplätzen, um begrünte Dachflächen, eine Ausstattung mit Photovoltaik und eine Beschattung von versiegelten Flächen zu vereinen.

Im Mittelpunkt steht ein Konstruktionsprinzip, das ursprünglich von Julius Natterer entwickelt wurde. Seine Idee beruhte darauf standardisierte Massivholzquerschnitte in zwei Trägerscharen durch das Stapeln von gekreuzten Massivholzquerschnitten anzuordnen. Verwendet man Bretter handelte es sich dabei um die bekannten Brettstapel-Rippenschalen, die 1980 zum ersten Mal mit dem «Polydôme» an der EPFL in Lausanne realisiert wurde.



Abbildung 4: Werkhalle in Saint Jean de Soleymieux; F 1993

Stapelt man quadratische Massivholzquerschnitte, entstehen Balkenroste. Sie wurden zum ersten Mal 1992 im Rahmen des Cours Postgrades an der EPFL in Lausanne angedacht. Der Vorschlag, Balken zu Rosten zu stapeln, war damals neu und wurde deshalb als Pilotprojekt wissenschaftlich und im Rahmen von Laborprüfungen an der EPFL untersucht. Die Umsetzung (siehe Bild links) erfolgte dann mit einem der Teilnehmer des Kurses, Olivier Gaujard, der das erste Balkenrost aus gestapelten Massivholzquerschnitten für die Überdachung einer quadratischen Werkhalle von 24 x 24 m seiner Zimmerei in Saint Jean de Soleymieux, F realisierte.

Mit unserem Ingenieurbüro ICS-Bois entwickelten wir dieses Prinzip zwischen 1993 und 1995 weiter und realisierten diverse Balkenroste, wie die sichtbare Dachkonstruktion für ein Hotel in les Arcs 1800, F und eine 1100 m² Werkhalle auf dem Experimentalgelände in Cantercel, F.



Abbildung 5: Hotel les Arcs 1800, F 1993



Abbildung 6: Werkhalle am Experimentalgelände in Cantercel, F 1995

Alle Studien stützten sich auf Laborversuche an der EPFL, die von einer relativ hohen Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel ausgingen, was eine Reduktion des ideellen Querschnitts von 30-35% bedeutete. Entsprechende Verformungsmessungen an den besagten Projekten bestätigten diese Werte.

Eine neue Perspektive zur Steigerung der Effizienz dieses Tragsystems zeichnet sich in den letzten Jahren ab, als die Firma Rothoblaas an Herrn Dr. Roland Maderebner, Wissenschaftler an der Universität Innsbruck, herantrat, um einen neuen aus der Luftfahrt kommenden Konnektor mit dem Namen «Sharp» auf dessen Einsatzmöglichkeit und die Leistungsfähigkeit wissenschaftlich zu untersuchen. Die Testergebnisse bestätigten tatsächlich, dass nicht nur die Tragfähigkeit deutlich höher ist, sondern auch dass die Nachgiebigkeit, der sogenannte Schlupf, deutlich geringer ist als bei herkömmlichen Verbindungsmitteln. Es lag daher nahe diese positiven Erkenntnisse dazu zu nutzen, die Leistungsfähigkeit des bisherigen Balkenrosts deutlich zu verbessern und für den Einsatz zur Unterstützung von Photovoltaikanlagen zu optimieren.

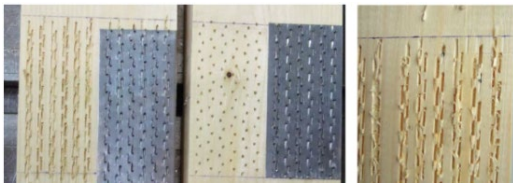


Abbildung 7: Sharp Verbinder im Versuch an der UI

Neben den obengenannten Zielen geht es bei diesem Forschungsprojekt vor allem darum das Potential der Redundanz zu nutzen, um sicherer, ressourcenschonender und nachhaltiger zu bauen, und somit den Einsatz von Photovoltaikanlagen in Verbindung von Verschattung und Begrünung zu erhöhen, ohne zusätzliche Naturflächen zu verbauen.



Abbildung 8: Balkenrost zur großzügigen schattenspendenden Überdachung mit vorgespannten Dachmembranen, die sich bei Bedarf streifenweise auswechseln lassen. Cantercel 1995, Architekt: Jean-Pierre Campredon
Entwurf, Berechnung und Errichtung: Michael Flach, Jaques Anglade und Olivier Gaujard

4. Ausblick auf 2-achsige gespannte Deckensysteme

Neben redundanten stabförmigen Tragwerken wie Balkenroste oder Rippenschalen, lässt sich die Redundanz auch in flächenförmigen Tragelementen aus Holz wiederfinden. Bestes Beispiel ist die großformatige Brettsperrholzplatte, auch CLT genannt, um auf die gekreuzte Anordnung der Lagen zu verweisen. Der wichtigste Grund für die zweiachsige Anordnung der Bretter war ursprünglich die Sperrwirkung zwischen den Lagen untereinander, damit eine hohe Formstabilität gewährleistet ist. Es entsteht aber vor allem ein redundantes System, das auf zwei Phänomene zurückzuführen ist: Einerseits ist es die kontinuierliche Verbindung zwischen den Brettlagen untereinander (das gilt übrigens auch für Brettstapeldecken). Andererseits sind die Brettlagen in 2 unterschiedlichen Richtungen

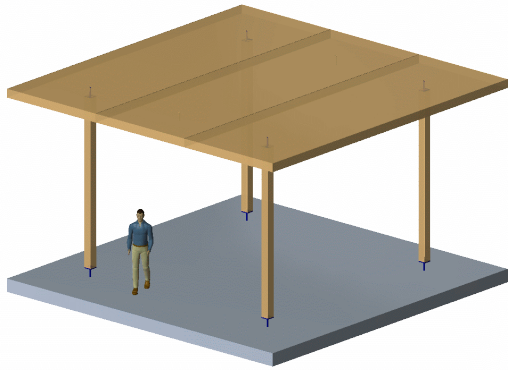


Abbildung 9: punktgestützte Flachdecke

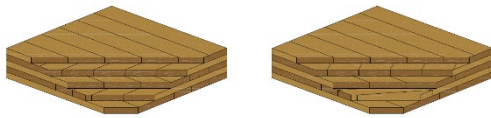


Abbildung: 10 CLT (links) und DLT Panel (rechts)

gespannt, so dass Lasten in 2 Richtungen abgeleitet werden können. Wichtige Anwendungen sind punktgestützte Flachdecken in Holz mit quadratischen Stützenraster. Ziel dieser Bauweise ist es niedrigere Deckendicken zu erzielen, indem man auf die Balkenlage verzichtet, so dass Durchdringungen mit Installationsleitungen vermieden werden. Voraussetzung war die Entwicklung eines Systemverbinders, der den Widerstand gegen Durchstanzen wesentlich erhöht. Ergebnis war der von Dr. Roland Maderebner und Dr. Bernhard Maurer entwickelte «Spider». Damit war es möglich Rastermasse von bis zu 7 x 7 m zu erreichen. Ein weiterer Schritt der Entwicklung einer optimalen Flachdecke beruhte in der Adaptierung der Steifigkeitsverhältnisse zwischen den beiden Brettscharen, um eine gleichmäßige Lastverteilung zu gewährleisten. Letztendlich wurde ein völlig neues Produkt wie die DLT (diagonal laminated timber) Platte entwickelt.

5. Schlussfolgerung

Redundanz ist ein Naturprinzip zur Steigerung der Effizienz von Systemen aller Art, insbesondere der von Tragwerken. Durch die weitgehende Verwendung von ein- oder zweidimensionalen Tragwerkskonzepten wurde dieses Prinzip jedoch immer mehr vernachlässigt, weil es darum ging die wirtschaftliche Rentabilität durch Vereinfachung der Planung und Fertigung zu fördern. Dass dabei nicht nur die Leichtigkeit und Eleganz räumlicher Strukturen verloren geht, sondern auch die Resilienz und die Robustheit von Bauwerken, ist bedenklich, vor allem wenn es darum geht Menschen zu beschützen, die sich bei Massenveranstaltungen wie den olympischen Spielen darunter aufhalten. Dieser Vortrag soll Ingenieurinnen und Ingenieure dazu anregen nicht nur möglichst einfach zu konstruieren, sondern smarte, anmutige und nach dem Vorbild der Natur effiziente ressourcenschonende Tragwerke zu entwickeln, nach dem mahnenden Leitprinzip der Natur «wer verschwendet, der verschwindet».

6. Veröffentlichungen

- [1] Large scale timber architecture, Japanese architecture review, Saint Gratien, centre départemental de formation d'animation sportive, Seite 20-23 Japan, 1995
- [2] European Gluelam Award 1996, Brochüre der ausgezeichneten Projekte, Seite 24 und 25
- [3] Dossier Technique, le Moniteur des travaux publics et du bâtiment, charpente tridimensionnelle de 6300m² mixte bois /acier Paris 1/1996 Seite 73
- [4] Grandes structures novatrices en France, ESB 1999 le bois dans la construction, M. Flach & C. Frenette, Seite 41 – 45
- [5] Französische Innovationen, Holzbau-Magazine, 2000, Seite 36 und 36, Atelier in Cantercel
- [6] Vom Experiment zum Tragwerk, Vortrag und Tagungsband zur Werkhalle in Cantercel, Michael Flach, SHI Tagung Weinfeldern 2004
- [7] Smart Timber Grids, Forschungsantrag der Universität Innsbruck bei der Tiroler Innovationsförderung 2023, Michael Flach und Roland Maderebner