



*Hermann Blumer
Dipl. -Ing. ETH/SIA
Création Holz
Herisau, Schweiz*

Wärme- und Diffusions- verhalten von Massivholz - nicht nur der U-wert zählt

**Thermal and diffusion behavior of
solid wood – the heat transfer
coefficient is only part of the story**

**Comportamento al calore e alla
diffusione del legno massiccio –
non é determinante solo il valore U**

Dokument in Deutsch

Wärme- und Diffusionsverhalten von Massivholz - nicht nur der U-wert zählt

1 Zusammenfassung

Gebäudehüllen, Decken und Innenwände werden von der Firma Nägeli in einer verdübelten Massivholzbauweise hergestellt. Die Firma verwendet dabei hauptsächlich sägerohe Brettware in getrocknetem Zustand. Diese werden aus Sägereien der Region über kurze Wege angeliefert.

Massivholzhüllen erreichen nach klassischen Berechnungen selbst bei grossen Wandstärken von 360 mm nicht über die für den Minergie-Standard geforderten U-Werte mit ca. $0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Andererseits spricht man aber diesen Massivholzkonstruktionen gefühlsmässig eine hohe Kapazität zur Temperatur- und Feuchtebalance zu.

Beim diesem vom schweizerischen BUWAL unterstützten Projekt bestand unsere Aufgabe darin, zu zeigen, wie das Zusammenwirken der verschiedensten Faktoren wie z.B. die Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe mit den Wärmespeicherkapazitäten ist und wie sich das dynamische Aussenklima auf das statische Innenklima durchschlägt.

Eine weitere Aufgabe bestand darin, verlässliche Aussagen betreffend der Temperaturen und der Luftfeuchten in den Räumen der AppenzellerHolZ-Häuser zu machen. Die Erarbeitung von Nachweisverfahren stand somit im Mittelpunkt dieser Arbeit. Mittels einer Fallstudie wird aufgezeigt, wie ein Gebäude energetisch simuliert werden kann und wie man daraus Schlüsse für zukünftige Systemoptimierungen zieht.

Es geht in diesem Referat im Weiteren darum, die Mechanismen kennenzulernen, durch welche das Gebäude sich thermisch und in Bezug auf Luftfeuchte auf den Menschen auswirkt und die diesbezüglichen Behaglichkeitsbedürfnisse zu formulieren, um ein möglichst optimales Innenklima zu schaffen.

Die thermische Behaglichkeit des Menschen wird bis anhin oft dominant zusätzlich durch die Wechselwirkung mit dem haustechnischen System garantiert. Da die Haustechnik Betriebsenergie verbraucht, muss es das Ziel sein, das Gebäude so zu konstruieren, dass es auf möglichst wenige technische Zusatzsysteme angewiesen ist.

Anhand der ersten Resultate aus Testmessungen an laufende Versuche am Lehrstuhl für Holzwissenschaften können die Unterschiede verschiedener Wandkonstruktionen nun auch wissenschaftlich aufgezeigt werden



Abbildung 1, 2 und 3: Bilder aus der Produktion der Firma Nägeli und den Versuchsboxen am Lehrstuhl für Holzwissenschaften an der ETH Zürich

2 Einleitung

"WIR MÜSSEN DANACH STREBEN, NATUR, GEBÄUDE UND MENSCH ZU EINER HÖHEREN EINHEIT ZUSAMMENZUBRINGEN"

Le Corbusier (1887-1963)

Dieses Zitat von Le Corbusier beinhaltet mit wenigen Worten unseren gesellschaftlichen Auftrag für das Bauen von morgen. Im Zeitalter der knapper werdenden Rohstoffe und der drohenden Klimaerwärmung müssen wir unsere Gebäude so erstellen, dass sie nach und nach die Zielsetzungen einer 2000 Watt Gesellschaft im Bereich Wohnen und Bauen entsprechen. Das können wir, indem wir der Nachhaltigkeit dienen, indem wir die Bauten auf das Standortklima abstimmen und wenn wir diese mit „mitdenkenden“ Gebäudehüllen einkleiden. Es muss uns auch gelingen, einfache Werkzeuge bereit zu stellen, mit welchen die Planer, die Unternehmer und die Bewohner die Heizenergie mehr und mehr Richtung Nullverbrauch lotsen können.

Dass der Baustoff Holz dazu einen wichtigen Beitrag leisten kann, bezweifelt niemand. Wichtiger ist die Frage, wie Holz dies mit einem ressourcenschonenden Auftritt lösen kann. Da verbautes Holz als CO₂-Speicher gilt, wird der Einsatz von Massivholzkonstruktionen als positiv gewertet.

In diesem Projekt wollen wir, wie bereits erwähnt, überzeugende und Verkaufs fördernde Argumentationen für eine Bauweise mit grossem Holzanteil finden. Dies soll im Bewusstsein geschehen, dass damit eine ganzheitlich gute Ausrichtung für den gesellschaftlichen Gemeinnutzen und den Eigennutzen des Eigentümers bzw. Bewohners erreicht werden kann. Dabei sind alle Aspekte des Materialeinsatzes, der Grauenenergie, der Emissionen, der Systemleistungen, der Beständigkeit und vor allem der Interaktion mit dem Standortklima und der Ausrichtung zu integrieren.

Das Fehlen an überschaubaren und verlässlichen Nachweisverfahren zur Berechnung des Energiehaushaltes und der Feuchtezustände innerhalb der Konstruktionen und der Räume in massiven Holzbauten machte unsicher. Wir wussten nicht so recht, wie vorteilhaft solche Holzbauten sind und was hat der U-Wert für eine Bedeutung. Aus dieser Fragenstellung heraus ist die Projektidee entstanden. Wir sind zuversichtlich, dass es nun gelungen ist, mehr Transparenz zu erlangen. Wir glauben daran, über die gewonnenen Erkenntnisse der Holzanwendung neue Chancen verschaffen zu können. Wir hoffen, dass sich die Mehrnutzen für die Kunden herumsprechen.

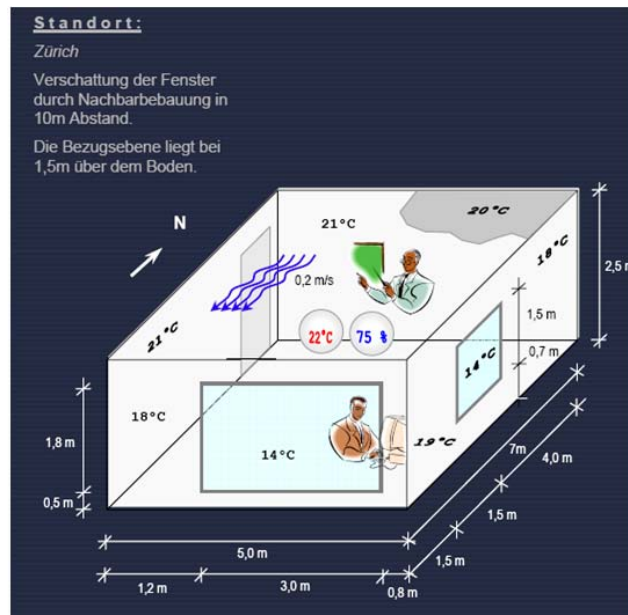


Abbildung 4: Wie reagieren die Temperaturen in den einzelnen Räumen mit dem dynamischen Aussenklima?

3 Systemgedanke, Produkt und die Herstellung



Abbildung 5, 6 und 7: Die Produktionsanlage in Gais, Hartholzdübel in Bereitschaft und eine produzierte AppenzellerHolz-Wand mit 360 mm Stärke

Das Wandprodukt AppenzellerHolz der Firma Nägeli setzt sich aus mehreren gekreuzten Brettlagen zusammen. Der Verbund wird durch Hartholzdübel gewährleistet. Mit zwei Papiereinlagen wird die Winddichtigkeit garantiert ohne der Wand die "Atmungseigenschaft" zu nehmen. Die Herstellung verläuft auf einer für den Produktzweck speziell neu entwickelten Dübel-Einpressanlage. Diese wurde ergänzt mit CNC-Formatierungseinheiten. Damit wird eine hohe Leistungsfähigkeit mit einer hohen Massgenauigkeit erreicht. Die Vorteile der Präzision werden bei der Montage ersichtlich.

Mit diesem Verfahren wird es möglich, massive Holzwände in der Stärke von 360 mm herzustellen und diese Holzmasse multifunktional für die Statik, die Wärmedämmung, die Energiepufferung, die Feuchtebalance, die Schalldämmung und den Brandwiderstand zu nutzen.

Wenn man diesem "emissionsfreien" System auch wohlwollend gegenüberstehen mag, so verlagern sich die Diskussionen immer wieder auf die scheinbar dürtige Wärmedämmung. Dem gegenüber stehen Aussagen von Nutzern bereits erstellter Bauten. Sie vermitteln keineswegs den Eindruck, die AppenzellerHolz-Wände seien schlecht wärmegeklämt.

4 Fallstudie am Haus Mittelholzer in Gonten AI (920 m ü. M.)

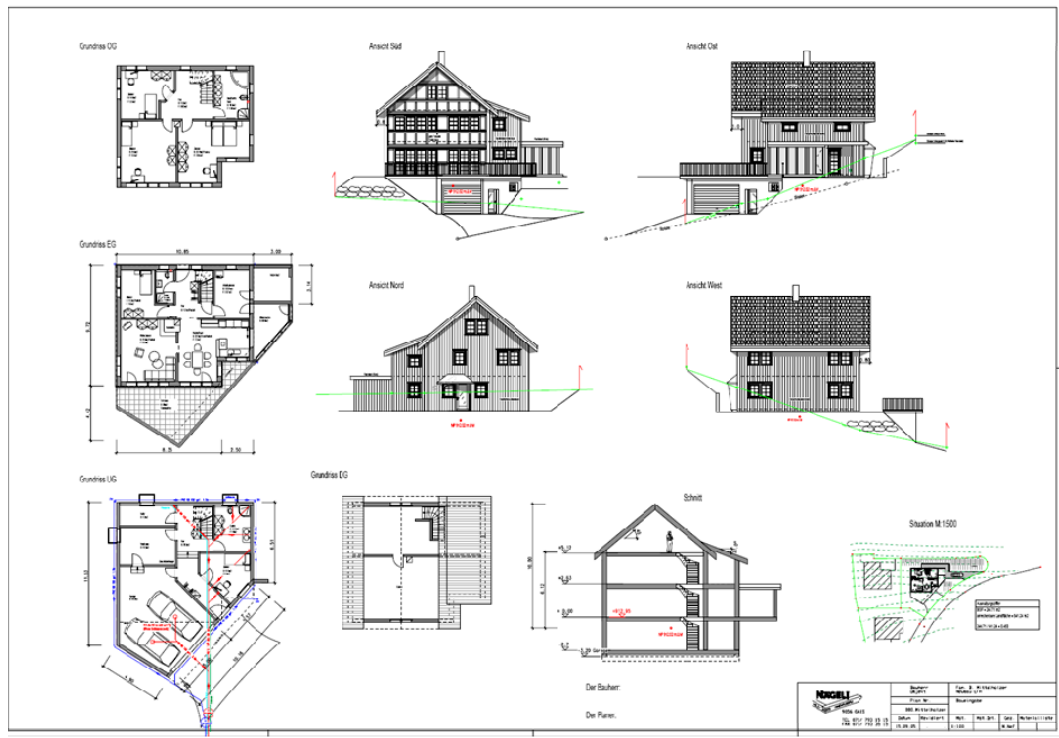


Abbildung 8: Plangrundlagen des Hauses Bruno Mittelholzer in Gonten

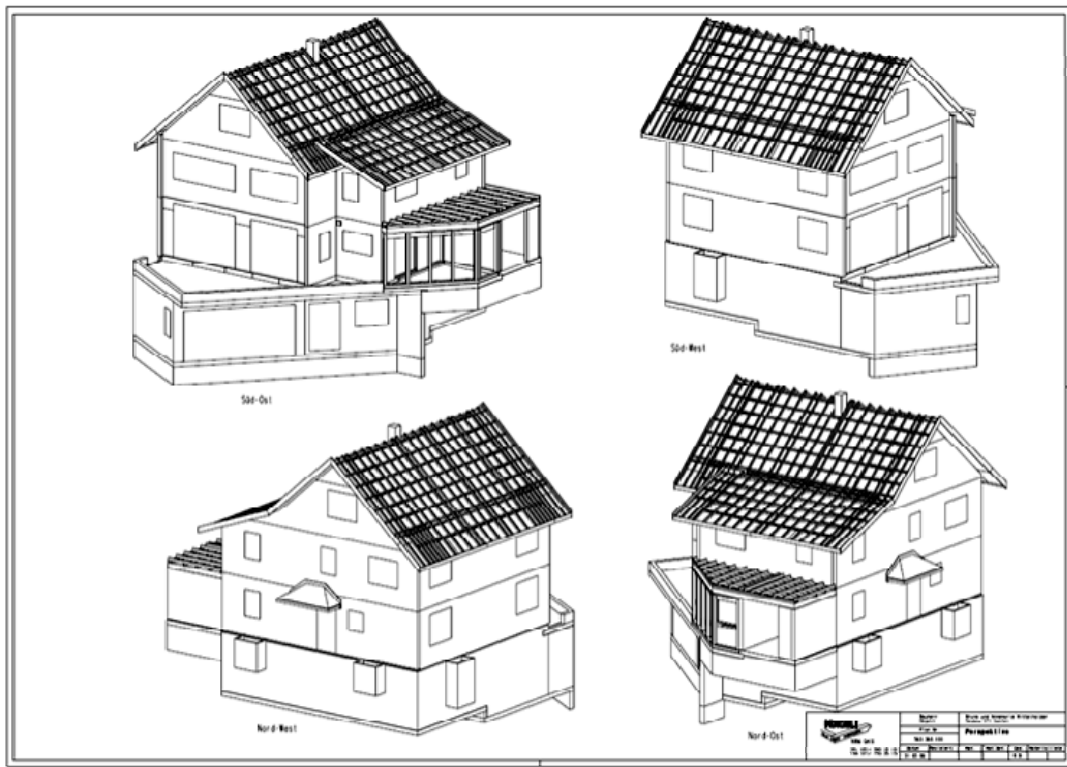


Abbildung 9: Isometrien des Hauses Bruno Mittelholzer in Gonten

4.1 Wandaufbau:

- AppenzellerHolZ 180 mm $\lambda = 0.097 \text{ W/mK}$ (Messung ETHZ)
- AppenzellerHolZ 180 mm $\lambda = 0.097 \text{ W/mK}$
- Weichfaserplatte 35 mm $\lambda = 0.040 \text{ W/mK}$
- Hinterlüftung nicht berücksichtigt
- Fassadenverkleidung nicht berücksichtigt

● Süd: gestemmter Täfer

● West: Bretterschirm

● Nord: Bretterschirm

● Ost: Bretterschirm

Angenommener statischer Wert $U = 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$

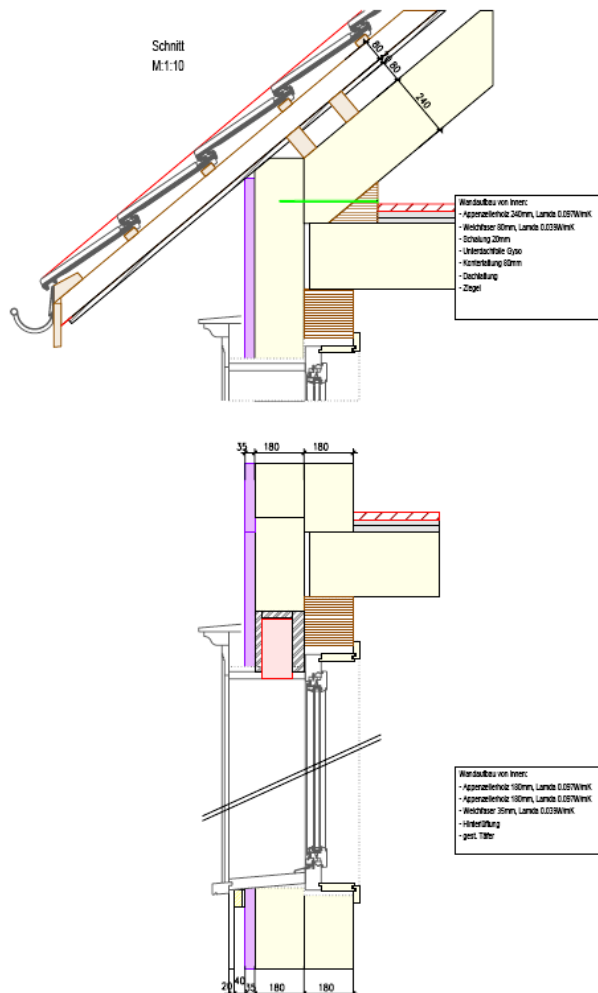


Abbildung 10: Schnitte durch die Wand, den Boden und das Dach.

4.2 Deckenaufbau EG, OG und DG:

- AppenzellerHolZ 240 mm $\lambda = 0.097 \text{ W/mK}$
- Weichfaser 44 mm $\lambda = 0.047 \text{ W/mK}$
- Bodenbelag Holz 20 mm $\lambda = 0.130 \text{ W/mK}$

Angenommener statischer Wert $U = 0.27 \text{ W/m}^2\text{K}$

4.3 Dachaufbau:

- AppenzellerHolZ 240 mm $\lambda=0.097 \text{ W/mK}$
- Weichfaser 80 mm $\lambda=0.047 \text{ W/mK}$
- Schalung 20 mm $\lambda=0.130 \text{ W/mK}$
- Unterdachfolie nicht berücksichtigt
- Konterlattung 80 mm nicht berücksichtigt
- Dachlattung 24 mm nicht berücksichtigt
- Ziegel nicht berücksichtigt

Angenommener statischer Wert $U = 0.22 \text{ W/m}^2\text{K}$

4.4 Fenster und Verglasung Wintergarten:

- Glas mit Rahmenschwächung $U = 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}, g = 0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Fenster im Lichtschacht $U = 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}, g = 0$
- Fenstertüre Holzschopf $U = 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}, g = 0$

4.5 Türen:

- Haustüren $U = 1.40 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Zimmertüren 40 mm Nadelholz $U = 1.72 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Garagentor $U = 2.50 \text{ W/m}^2\text{K}$

4.6 Innenwände:

- AppenzellerHolZ 150 mm $\lambda=0.097 \text{ W/mK}$ $U = 0.58 \text{ W/m}^2\text{K}$

5 Grundlagen für die Simulationen

Bis vor wenigen Jahren setzte man die Prioritäten einer Simulation auf die Begrenzung des Verbrauchs der fossilen Energierohstoffe. Mit den aufkommenden Glashüllen wurde auch der sommerliche Wärmeschutz immer mehr zum Thema. Heute sollten wir darüber hinaus die von der ETH Zürich postulierte 2000 Watt-Gesellschaft beim Bauen und Nutzen der Gebäude anpeilen. Damit wird die Menge der Primärenergie zur Bereitstellung der Baustoffe eine mit zu berücksichtigende Grösse.

Als weiteres Merkmal werden die standortbezogenen Meteodaten und die Umgebungsverhältnisse betreffend Beschattung durch andere Bauten, Bäume usw. in die Betrachtungen mit aufgenommen. Die Berechnungen erfolgen über analytische Gleichungen und Gleichungssysteme. Die Zyklen pro Rechnungsgang betragen eine Stunde, dann werden die variablen Materialkennwerte angepasst. Gerechnet wird solange bis das System über alle Räume und ihre Bezüge eingeschwungen ist. Wir haben jeweils ein Jahr (8760 Stunden) simuliert. Es ist heute zusätzlich möglich, anhand von Normenwerten Aussagen über die Behaglichkeit in den Räumen zu machen. (DIN EN 7300)

5.1 Ausseneinwirkungen (Klima)

Berücksichtigt werden: (Meteodaten auf den Standort bezogen)

- Lufttemperatur
- Direktstrahlung
- Globalstrahlung
- Atmosphärische Gegenstrahlung

Nicht berücksichtigt sind:

- Windauskühlung (Schutz durch die Fassadenverkleidung und Ziegel)

5.2 Raumnummerierungen

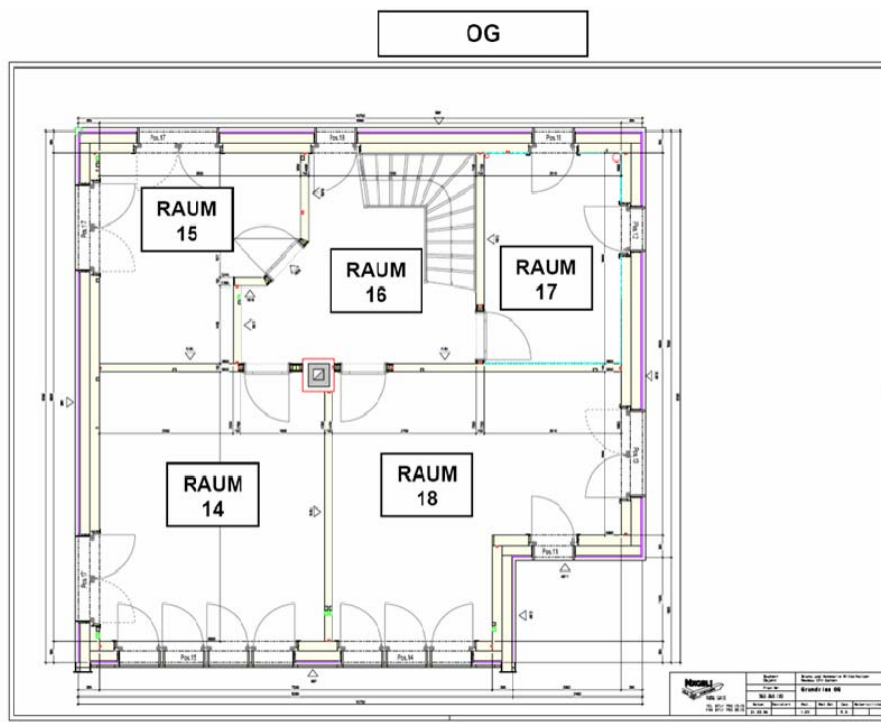


Abbildung 11: Obergeschoss mit Raumnummern 14 bis 18, geheizt

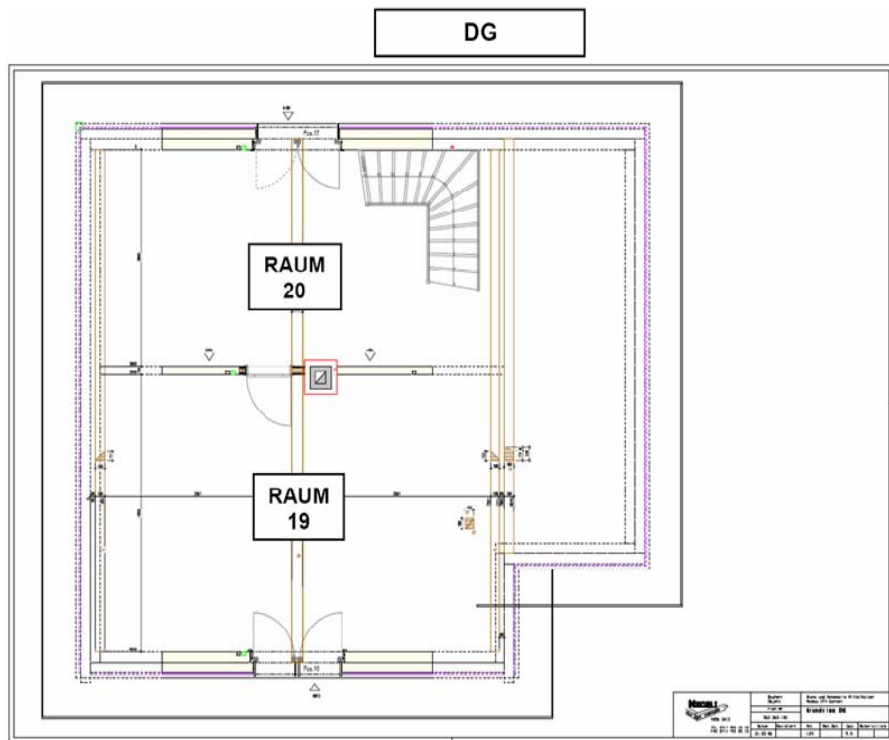


Abbildung 12: Dachgeschoss mit Raumnummern 19 und 20, nicht geheizt

6 Ermittlung der Jahres-Heizenergie über ein mittleres Klimajahr

6.1 Annahmen Aussentemperaturen

Die Mitteltemperatur beträgt in Gonten für das mittlere Jahr 7.02 Grad Celsius. Die tiefste Temperatur liegt in diesem Jahr bei -12.1 Grad, der maximale Wert wurde mit 26.3 Grad gemessen. Zur Ermittlung von Überhitzungszuständen haben wir auch ein warmes Jahr mit einer Mitteltemperatur von 9.3 Grad simuliert. Da es nicht zu Überhitzungen gekommen ist, verzichten wir in diesem Bericht auf die Darstellung der Resultate.

6.2 Annahmen Heizung

- Im EG sind die Räume 7 bis 11 auf 21 Grad geheizt. Der Wintergarten mit der Nummer 12 bleibt in der Berechnung ungeheizt. Der Raum 13 ist ein nach aussen offener Holzschopf.
- Im OG sind alle Räume von 14 bis 18 auf 21 Grad temperiert.
- Im DG bleiben die Räume 19 und 20 kalt.

6.3 Vergleiche AppenzellerHolZ mit der Ständerkonstruktion

Mit den obigen Annahmen wurden zwei Fälle von Wand- und Dachausführungen gerechnet.

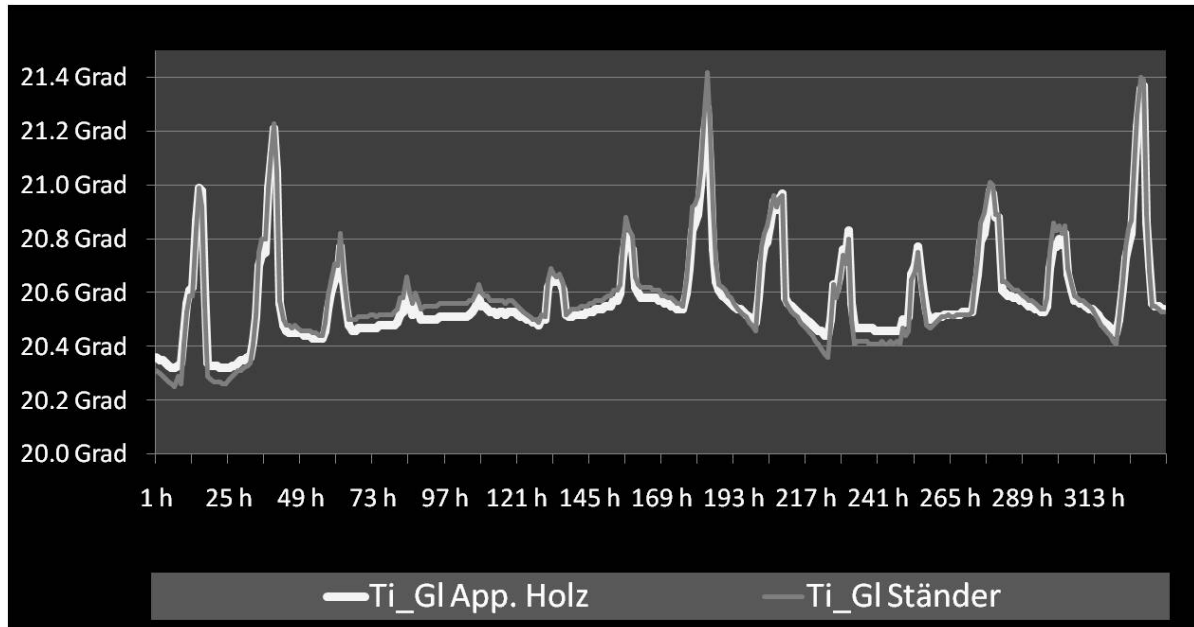
- Fall 1: Ausführung AppenzellerHolZ (360 mm Massivholz, 35 mm Weichfaserplatte)
- Fall 2: Ausführung Ständer (OSB 19mm – Mineralfaser 140 mm - OSB 19mm)

Die statischen U-Werte der beiden Konstruktionen wurden gleichwertig mit 0.25 W/m²K in die Rechnung eingeführt.

7 Auswertungen AppenzellerHolz (Nägeli) versus Ständer

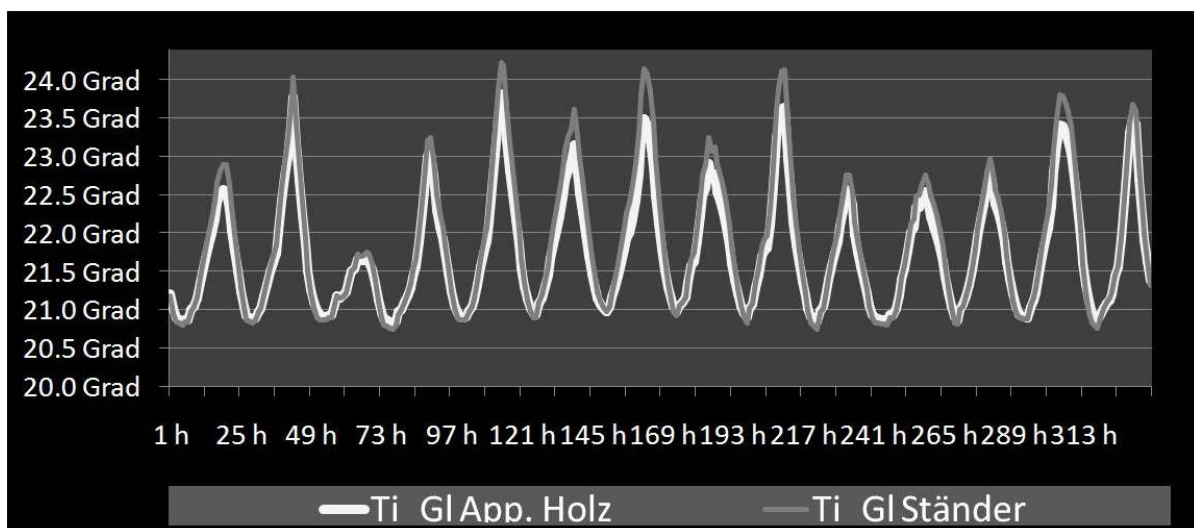
7.1 Raum 15 im OG geheizt - Wochen 3 und 4 / Winter

Tabelle 1: Im geheizten Raum wirkt sich der Unterschied der beiden Konstruktionen nicht merkbar aus. Die Spitzen in den Kurven sind die Folgen aus der Einstrahlungsenergie durch die Fenster



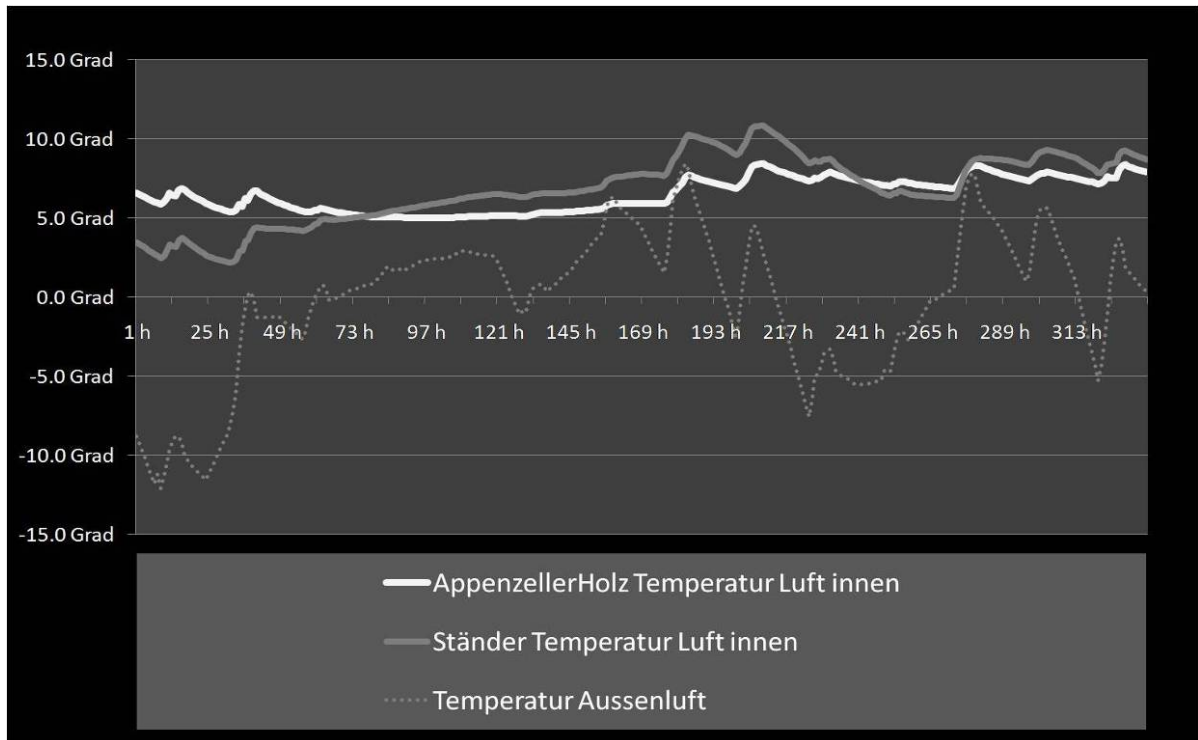
7.2 Raum 15 im OG - Wochen 33 und 34 / Sommer

Tabelle 2: Im Sommer ohne Heizung wirkt sich der Unterschied der beiden Konstruktionen vor allem bei Überhitzungstagen aus. Die Spitzen der Kurven einer Massivholzwand liegen unterhalb der Spitzen der Ständerwand. Der Ständerbau reagiert heftiger auf das dynamische Aussenklima. Man kann hier bereits vermuten, dass Menschen solche Schwankungen wahrnehmen



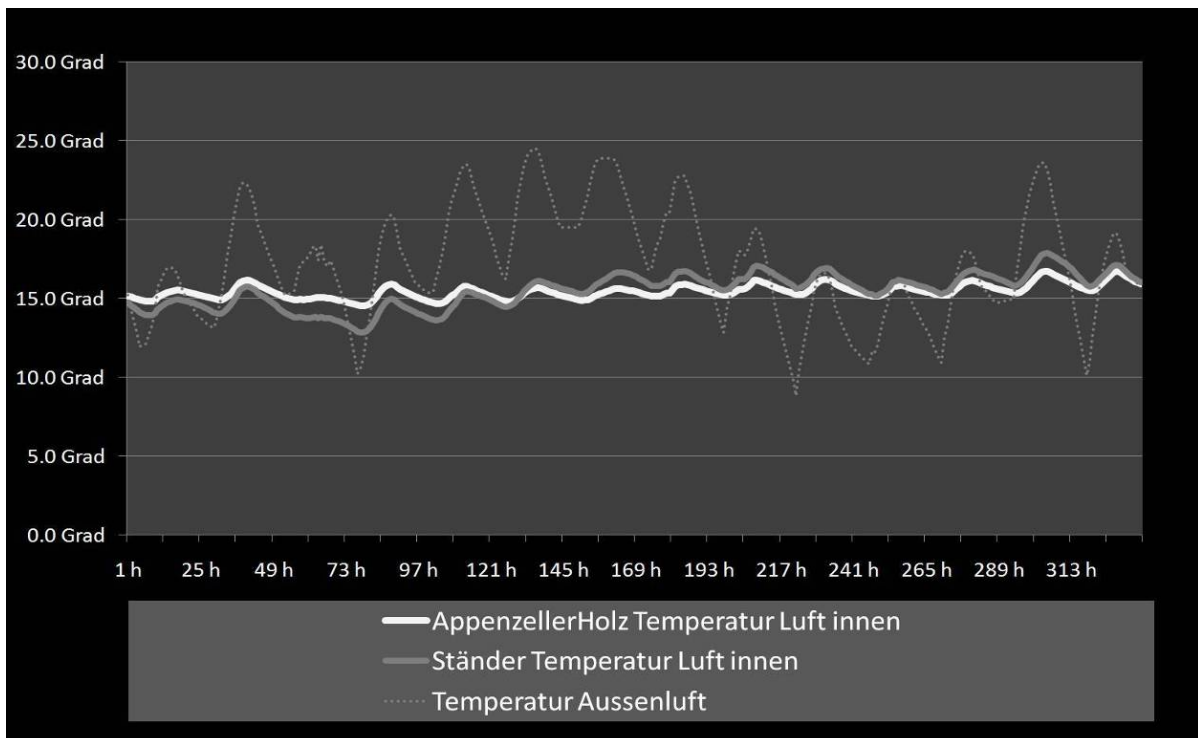
7.3 Raum 19 im DG - Wochen 3 und 4 / Winter

Tabelle 3: Nicht geheizte Massivholzkonstruktionen haben eine ausgleichende Wirkung bzw. trägeres Verhalten, nicht dass sie im Winter wärmer wären, die dynamischen Schwankungen sind sichtbar moderater



7.4 Raum 19 im DG - Wochen 33 und 34 / Sommer

Tabelle 4: Dieselbe Aussage kann für den Sommer gemacht werden



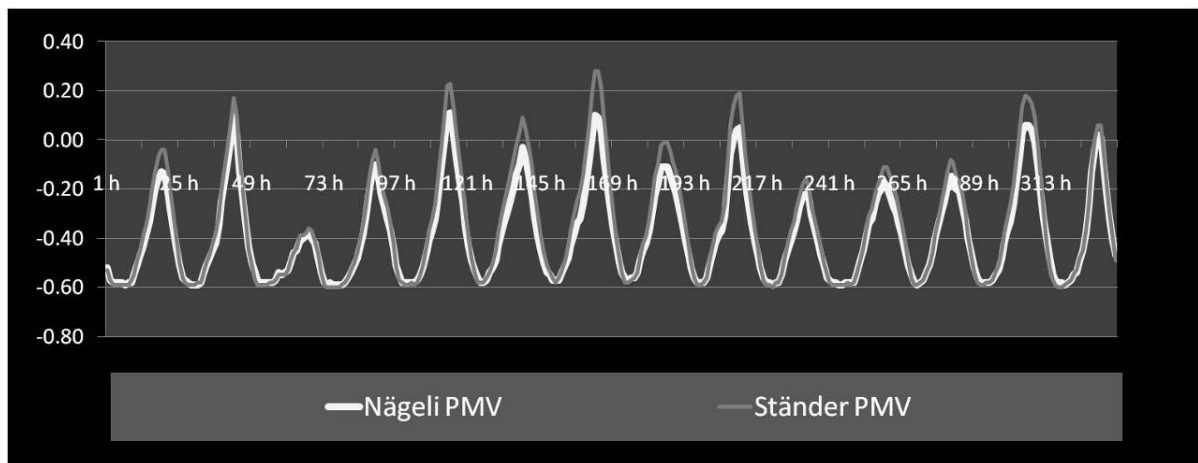
8 Bewertung der Behaglichkeit mit dem PMV

Zur Definition der Behaglichkeit wird der PMV (Predicated Mean Vote) beigezogen. Der PMV beschreibt den durchschnittlichen Grad der Wärmeempfindung der Person (Skala: -3=zu kalt bis +3 = zu warm).

+ 3	heiß
+ 2	warm
+ 1	etwas warm
0	neutral
- 1	etwas kühl
- 2	kühl
- 3	kalt

8.1 Auswertung PMV in den Wochen 33-34

Tabelle 5: Die Temperatur ist bei der angenommenen leichten Bekleidung bei 21 Grad eher zu kalt. Die Strahlungswärme, die über Tag eintrifft, korrigiert den Wert nach knapp "etwas warm". Der Unterschied der Massivbauweise zeigt sich nicht unten, da der Raum bei einer Temperatur unter 21 Grad nachgeheizt wird. Oben hingegen sind die Spitzen im Ständerbau höher.



8.2 Monoblockmessungen am Institut für Baustoffe der ETH ZÜRICH

Für bessere Einblicke in die Dynamik der Temperatur- und Feuchtebalancen innerhalb der Konstruktion und des durch sie umschlossenen Raumes wurden nach den Erfahrungen mit der Versuchstruhe bei der Firma Nägeli, an der ETH neue Versuchseinrichtungen aufgebaut. Man verzichtete auf Fenster und Öffnungen. Innerhalb und ausserhalb von drei Monoblocks werden zurzeit Messungen des Temperaturverlaufs und der Feuchte wissenschaftlich durchgeführt. Als Konstruktionsvarianten wurden ein "Ständerbau", das System "Schuler" und das System "AppenzellerHolZ" gewählt.



Abbildung 13, 14, 15 und 16: Die 3 Monoblocks in Ständerbau, Schulerwand und AppenzellerHolz und das Messgerät im Versuchskörper AppenzellerHolz

Schnitt A-A Maßstab 1:20

Technical drawing of cross-section A-A of the cabinet. The drawing shows the internal structure with dimensions in mm. The total height is 1500 mm. The top panel is 180 mm thick. The side panel is 180 mm thick. The bottom panel is 180 mm thick. The internal height is 1210 mm. The internal width is 1500 mm. The top panel is inclined at 10.00°. The internal width is 1500 mm. The internal height is 1210 mm. The internal width is 1500 mm. The internal height is 1210 mm.

Schnitt B-B Maßstab 1:20

Technical drawing of cross-section B-B of the cabinet. The drawing shows the internal structure with dimensions in mm. The total height is 180 mm. The side panel is 180 mm thick. The bottom panel is 180 mm thick. The internal height is 180 mm. The internal width is 1500 mm. The internal height is 180 mm. The internal width is 1500 mm. The internal height is 180 mm. The internal width is 1500 mm.

Grundriss Maßstab 1:20

Technical drawing of the ground plan of the cabinet. The drawing shows the internal structure with dimensions in mm. The total width is 1500 mm. The total depth is 1800 mm. The internal width is 1500 mm. The internal depth is 1800 mm. The internal width is 1500 mm. The internal depth is 1800 mm. The internal width is 1500 mm. The internal depth is 1800 mm.

Aufbau Aussenhüllen

Aufbau von innen nach aussen

Massivholzwand verkleidet (Appenzellerholz) 180mm

Massivholzwand verkleidet (Appenzellerholz) 180mm

Unterdachfolie Tyvek X2

Unterdachfolie Tyvek X2 (als allfällige Verschiebschicht)

Isometric view of the cabinet showing the front and side panels. The cabinet is a rectangular box with a front panel and side panels. The front panel has a handle. The side panels are visible on the right and left sides.

Isometric view of the cabinet showing the front and side panels with internal structure. The cabinet is a rectangular box with a front panel and side panels. The front panel has a handle. The side panels are visible on the right and left sides. The internal structure is shown with red lines.

Schnitt A-A Maßstab 1:20

Technical drawing of a cross-section A-A of a building facade. The drawing shows a window with a height of 1420 mm and a width of 1500 mm. The roof structure is shown with a slope of 10.00°. The wall thickness is 200 mm. The window frame is 40 mm thick. The insulation is 200 mm thick. The drawing includes various dimensions for the window, wall, and roof structure.

Schnitt B-B Maßstab 1:20

Technical drawing of a cross-section B-B of a building facade. The drawing shows a window with a height of 1420 mm and a width of 1500 mm. The roof structure is shown with a slope of 10.00°. The wall thickness is 200 mm. The window frame is 40 mm thick. The insulation is 200 mm thick. The drawing includes various dimensions for the window, wall, and roof structure.

Grundriss Maßstab 1:20

Technical drawing of the ground plan of a building facade. The drawing shows a window with a height of 1420 mm and a width of 1500 mm. The roof structure is shown with a slope of 10.00°. The wall thickness is 200 mm. The window frame is 40 mm thick. The insulation is 200 mm thick. The drawing includes various dimensions for the window, wall, and roof structure.

Aufbau Aussenwand

Aufbau von innen nach aussen

Schlier Blockholzplatten 35mm

Rippenkonstruktion vertikal 40/260mm

Dämmung Saglan SB 22 260mm

Lattung horizontal 40/80mm

Dämmung Saglan SB 22 80mm

Isorooft natur 35mm (Holzfaserdämmplatte)

Unterdachhölle Tyvek X2

Unterdachhölle Tyvek X2 (als allfällige Verschleisschicht)

3D perspective view of a building facade. The drawing shows a window with a height of 1420 mm and a width of 1500 mm. The roof structure is shown with a slope of 10.00°. The wall thickness is 200 mm. The window frame is 40 mm thick. The insulation is 200 mm thick. The drawing includes various dimensions for the window, wall, and roof structure.

3D perspective view of a building facade. The drawing shows a window with a height of 1420 mm and a width of 1500 mm. The roof structure is shown with a slope of 10.00°. The wall thickness is 200 mm. The window frame is 40 mm thick. The insulation is 200 mm thick. The drawing includes various dimensions for the window, wall, and roof structure.

15

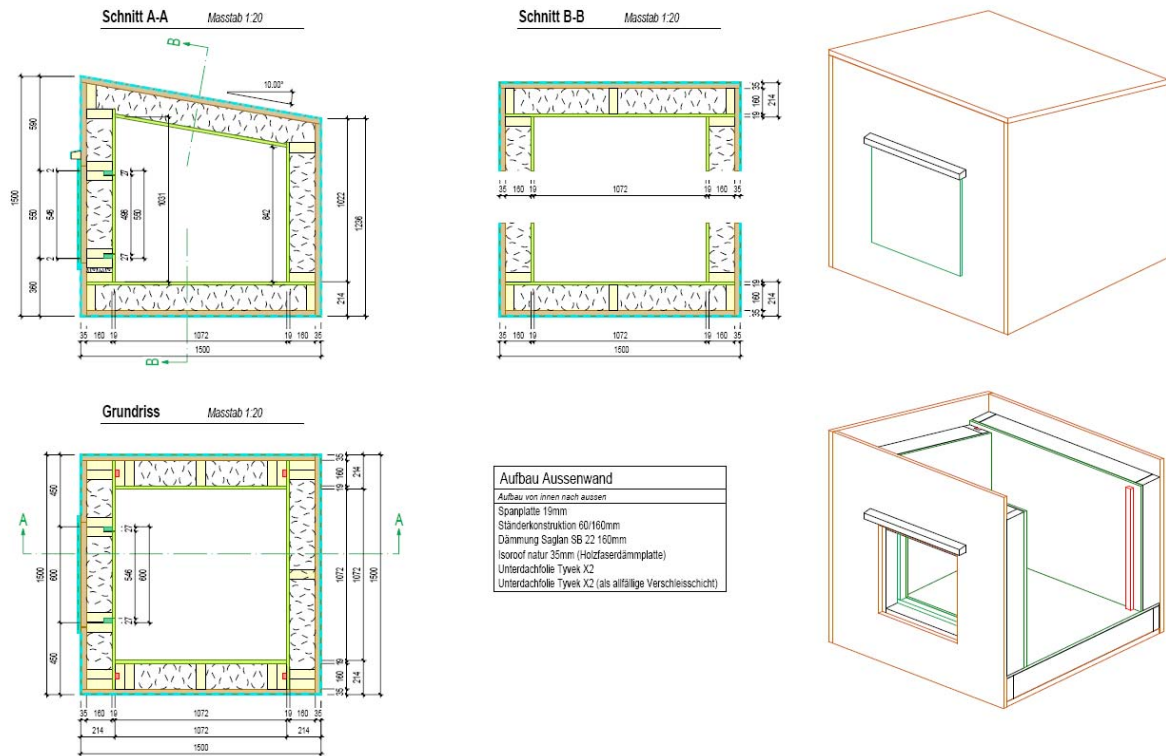


Abbildung 19: Der Ständermonoblock: 19 mm Spanplatte, 160 mm Saglan SB 22, 35 mm Holzfaserplatte

8.3 Auswertungen ETH-Versuche

8.3.1 Temperaturen im Innern der Monoblocks

Tabelle 6: Zeitraum vom 21.6.07 1800h bis 5.7.07 1800 h im Vergleich mit der Aussentemperatur. Es zeigen sich hier markante Unterschiede der Innentemperaturen.

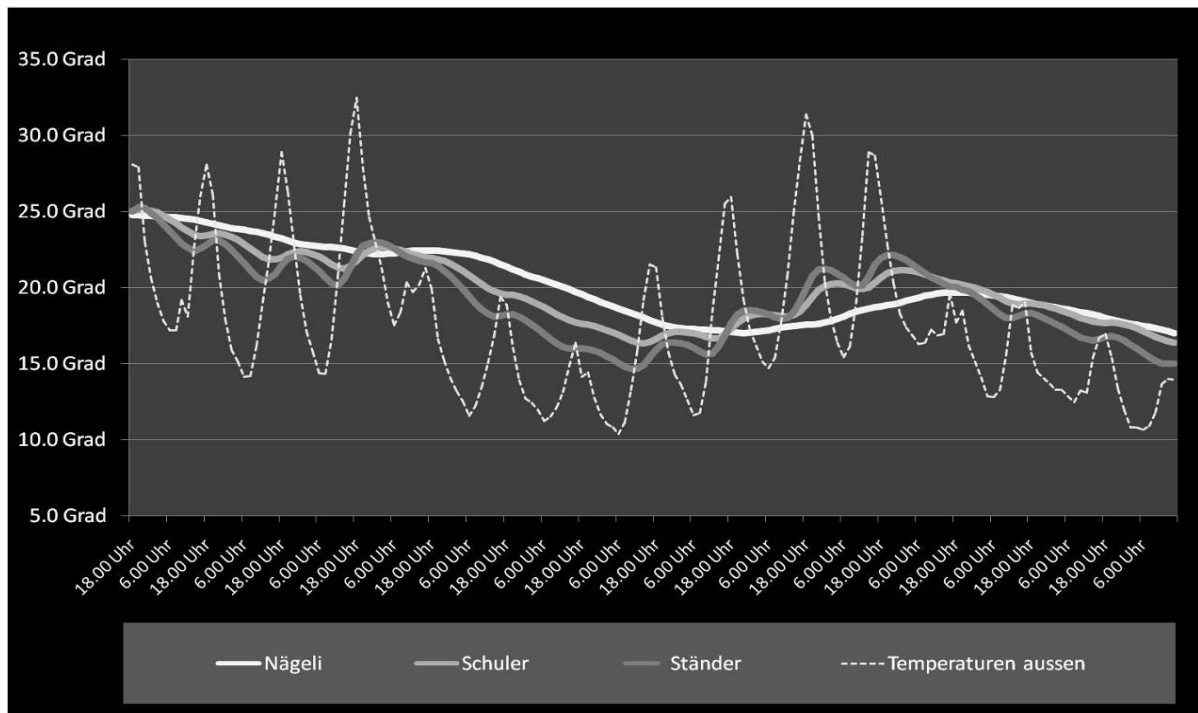
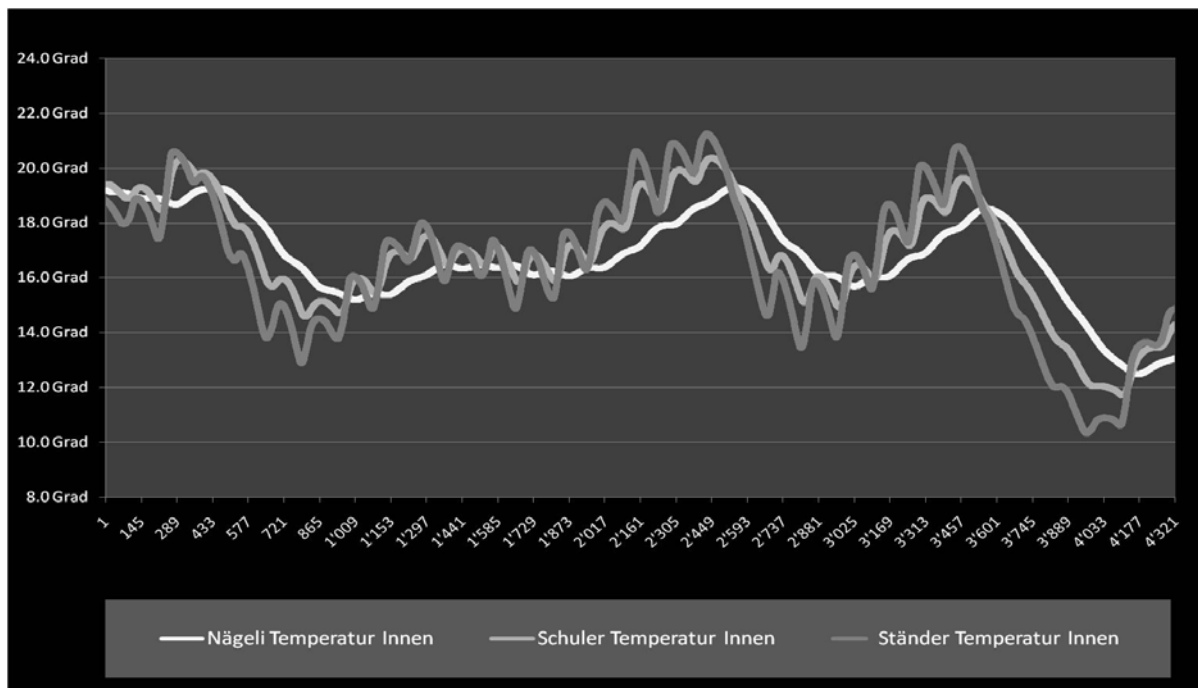


Tabelle 7: Zeitraum ganzer Monat September, auch hier treten die Unterschiede deutlich zu Tage



8.3.2 Luftfeuchte im Innern der Monoblocks

Tabelle 8: Zeitraum: 21.6.07 1800h bis 5.7.07 1800 h. Auch bei der Luftfeuchte sind die Unterschiede gross. Die Nägelvariante hat den tiefsten und homogensten Verlauf. Möglicherweise ist hier die Wirkung zu suchen, von der man in Fachkreisen spricht.

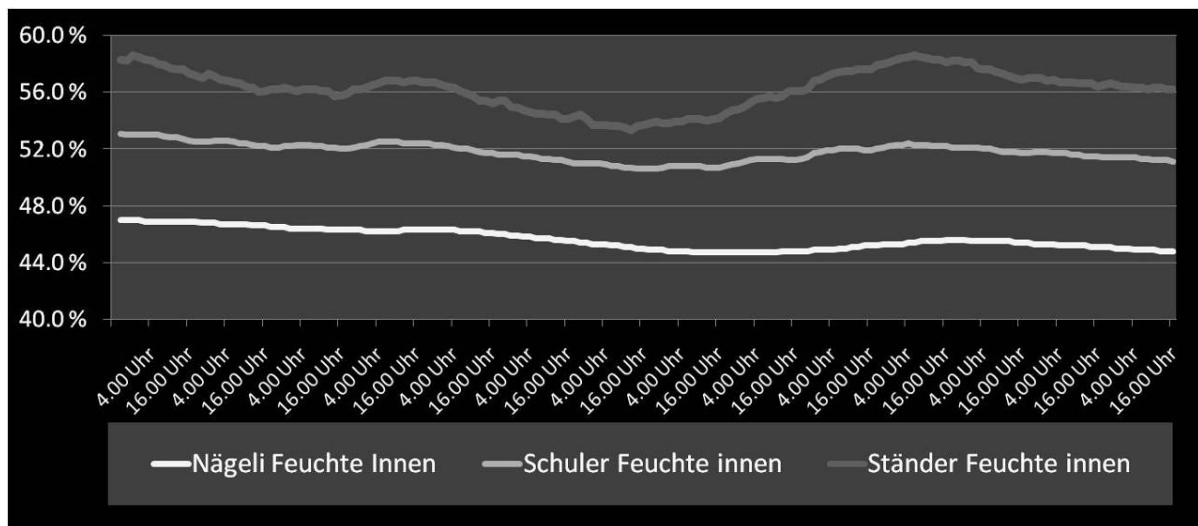


Tabelle 9: Zeitraum ganzer Monat September. Der Ständermonoblock ist noch feuchter geworden, der Nägelimonoblock pendelte sich bei ca. 45% ein

