Massivholzbausysteme und deren Einfluss auf die Raumtemperatur

---

Genagelte, geschraubte und gedübelte Massivholzbausysteme und Einfluss der Wärmekapazität auf die Raumtemperatur zur Vermeidung sommerlicher Überwärmung

Masterarbeit

Verfasst von: Michael Eyermann

Wien, April 2009

Betreut von:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Martin Treberspurg

Institut für konstruktiven Ingenieurbau
Department für Bautechnik und Naturgefahren
Universität für Bodenkultur, Wien

"Think global - act local"

Richard Buckminster Fuller

1895 - 1983

Danksagung

Ich möchte mich bei den folgenden Personen für die tatkräftige Unterstützung beim Entstehen meiner Masterarbeit bedanken:

Andreas Kempf (Sohm Holzbautechnik GmbH)
Christoph Lorünser (Walch GmbH)
David Longin (Holzbau Willibald Longin GmbH)
Dominik Baldauf (oa.sys baut gmbh)
DI (FH) Erich Rieser (Ing. Erwin Thoma Holz GmbH)
Georg Ganaus (Holzsystembau Georg Ganaus)
Karl Heinz Esterbauer (Holzhäuser Esterbauer)
Kaspar Greber (Kasper Greber Holz-Wohnbau GmbH)
Otmar Berger (Otmar Berger Zimmerei und Sägewerk)

sowie bei

Mag. Hildegund Mötzl für den Bereich Bauökologie und
DI Thomas Zelger für den Bereich Bauphysik und dynamische Gebäudesimulationen
(Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie).

Kurzzusammenfassung

Der Holzbau erlebt seit den letzten Jahrzehnten eine Renaissance. Neben dem etablierten Holzrahmenbau gibt es auch einen kleinen Markt für genagelte, geschraubte und gedübelte Massivholzbausysteme. In einer Recherche konnten in Österreich neun verschiedene Unternehmen ausfindig gemacht werden, die diese Systeme in den unterschiedlichsten Bauarten anbieten.

Mittels einer bauphysikalischen Simulationssoftware wurde der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit der raumumschließenden Gebäudeteile auf die Innenraumtemperatur während des Sommers errechnet. Es konnte gezeigt werden, dass im Tagesgang Baustoffe mit großer Wärmespeicherfähigkeit die Innenraumtemperaturamplitude stark dämpfen. Durch einfache Nachtlüftung ist es möglich, die in den Wänden und Decken gespeicherte Wärme effizient aus dem Gebäude abzuführen. Vorsatzschalen vor Wänden, Decken und Fußböden bewirken selbst bei Baustoffen mit hoher Wärmespeicherfähigkeit ein „Wegdämmen“, was zu hohen Temperaturamplituden im Tagesgang wie bei der Leichtbauweise führt. Des Weiteren wurden die Auswirkungen von unterschiedlichen Verschattungssystemen und Ventilationsstrategien auf die Innenraumtemperatur untersucht.

Schlüsselwörter:

Massivholzbau, leimfreie Verbindung, Wärmespeichervermögen, spezifische Wärmekapazität, sommerliche Überwärmung.

Abstract

The number of timber constructions rises steadily over the last decades. Besides the well established timber-frame constructions some other massive-wood building systems which are based on nailed, screwed and dowelled connections can be found on the market. In Austria, nine different companies are found which produce massive-wood building systems with different variations.

With a simulation software for building physics the effect of the thermal storage capacity of the room temperature with its surroundings, during summer, was calculated.

The results show that during a period of time of 24 hours, a high thermal storage capacity within the construction can minimize the variation of temperature in the room. By using air ventilation during the night is it possible to easily transport the heat from the walls and floors into the surrounding environment. However, this effect is slowed down by the facings usually installed in front of the walls and on the floors. The results show that in the case of reinforced-concrete buildings, designed with facings, a similar temperature variation can be reached when compared to timber-frame buildings, with lower thermal storage capacity. The effects of different shading and ventilation systems on the room temperature were also tested.

Keywords:

Massive-wood building systems, connections without glue, thermal heat storage capacity, summer overheating

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

Danksagung ... 3
Kurzzusammenfassung ... 4
Abstract ... 5
Inhaltsverzeichnis ... 7
Abkürzungsverzeichnis und Glossar ... 10
1. Einleitung ... 14
2. Motivation ... 20
2.1 Warum mit Holz bauen? ... 21
2.2 Warum Massivholz? ... 22
2.3 Warum nur genagelte, geschraubte und gedübelte Systeme? ... 23
3. Holzbauweisen ... 26
3.1 Geschichtliche Entwicklung ... 26
3.2 Aktuelle Entwicklungen ... 31
3.2.1 Rahmenbauweise ... 31
3.2.1.1 Tafelbauweise ... 32
3.2.1.2 Raumzellenbauweise ... 33
3.2.2 Ingenieurmäßiger Skelettbau ... 33
3.2.3 Moderne Holzmassivbauweise: ... 33
3.2.3.1 Stabförmige Elemente ... 35
3.2.3.2 Scheiben- bzw. Plattenförmige Elemente ... 35
3.2.3.2.1 Brettstapelbau ... 36
3.2.3.2.2 Brettsperrholz ... 37
3.2.3.3 Kastenförmige Elemente ... 37
4. Massivholzbausysteme (genagelt, geschraubt, gedübelt) ... 39
4.1 Holzsystembau Georg Ganaus ... 42
4.1.1 Naturi ... 42
4.1.2 Wandaufbau ... 44
4.2 Holzbau Willibald Longin GmbH ... 46
4.2.1 Dübelbaumsystem Londek ... 46
4.2.2 Brettstapelsystem Londyb ... 47
4.3 Otmar Berger Zimmerei und Sägewerk ... 49
4.3.1 Brettstapelelemente ... 49

4.4 Sohm Holzbautechnik GesmbH 51
4.4.1 Diagonal Dübelholz Brettstapelelemente 51
4.4.2 Wandaufbau 52
4.4.3 Deckenaufbau 53
4.5 Kasper Greber Holz-Wohnbau GmbH 55
4.5.1 Nadelstreifholz Brettstapelelemente 55
4.5.2 Wandaufbau 56
4.5.3 Deckenaufbau 56
4.6 Walch GmbH 58
4.6.1 Brettstapel 59
4.6.2 Wandaufbau 59
4.6.3 Deckenaufbau 60
4.7 oa.sys baut gmbh 61
4.7.1 Genagelte Brettstapeldecken 61
4.8 Ing. Erwin Thoma Holz GmbH 63
4.8.1 Holz100 Brettsperrholz 63
4.8.2 Wandelemente 64
4.8.3 Deckenelemente 66
4.8.4 Dachelemente 66
4.9 Holzhäuser Esterbauer 67
4.9.1 Kastenförmige Elemente Wood-Mega-Therm 67
4.9.2 Wandaufbau 68
4.9.3 Deckenaufbau 69
5. Einfluss des Wärmespeichervermögens auf die Raum-temperatur unter dynamischen Bedingungen 71
5.1 Bauphysikalischen Grundlagen - Wärmeschutz 71
5.2 Glossar - Wärmeschutz 75
5.3 Thermische Simulation unter dynamischen Bedingungen 80
5.3.1 Raummodell 81
5.3.2 Wand- und Deckenaufbauten 82
5.3.2.1 Aufbau Stahlbetonbau 82
5.3.2.2 Aufbau Holzleichtbau 83
5.3.2.3 Aufbau Holzmassivbau 85
5.3.2.4 Aufbauten mit Vorsatzschalen 86

5.3.3 Nomenklatur der Bezeichnungen 88
5.3.4 Verschattungsvarianten 89
5.3.5 Übersicht über die Simulationen 90
5.3.6 Auswertungen der Simulationen 90
5.3.7 Simulationsmodell 1 – ohne Verschattung und ohne Ventilation .. 91
5.3.7.1 Analyse der Innenraumtemperatur über 14 Tage 91
5.3.7.2 Analyse des eingeschwungenen Temperaturzustandes..... 92
5.3.8 Simulationsmodell 2 – mit Verschattungen und ohne Ventilation . 94
5.3.8.1 Analyse der Innenraumtemperatur über 14 Tage 94
5.3.8.2 Analyse des eingeschwungenen Temperaturzustandes..... 98
5.3.8.3 Gegenüberstellung der Wirkung von Innen- und Außenverschattungen über 14 Tage 100
5.3.9 Simulationsmodell 3 – mit kontinuierlicher Ventilation ohne Verschattung 102
5.3.9.1 Analyse der Innenraumtemperatur über 14 Tage 102
5.3.9.2 Analyse des eingeschwungenen Temperaturzustandes..... 107
5.3.10 Simulationsmodell 4 – mit tageszeitgesteuerter Ventilation, ohne Verschattung 109
5.3.10.1 Analyse der Innenraumtemperatur über 14 Tage 109
5.3.10.2 Analyse des eingeschwungenen Temperaturzustandes..... 113
5.4 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse 115
5.5 Diskussion der Simulationsergebnisse 117
6. Ausblick..... 122
7. Zusammenfassung..... 124
Quellenverzeichnis..... 127
Literaturverzeichnis..... 127
Verzeichnis persönlicher Mitteilungen 129
Verzeichnis telefonischer Mitteilungen..... 129
Abbildungsverzeichnis 130
Tabellenverzeichnis 137
Anhang..... 140
A1 Ökologische Kennwerte 140
A2 Parameter der TRNSYS Simulation 141
A3 Numerische Ergebnisse der statistischen Auswertung (Boxplots)..... 143

Abkürzungsverzeichnis und Glossar[1]

(A)	*Außenverschattung*
AP	*Acidification Potential* ist das Versauerungspotential. Dieses gibt die Tendenz einer Komponente säurewirksam zu werden an.
AW	*Außenwand*
Dübelbaumdecke	Auch *Dübbelbaumdecke* oder *Dippelbaumdecke* genannt. Die Zwischenräume in den Deckenbalkenfeldern werden mit nebeneinander gelegten Kanthölzern in Laufrichtung der Deckenbalken ausgefüllt. Die Querschnitte der Zwischenhölzer sind etwas kleiner, dreiseitig besäumt, wodurch die Oberseite rund ist. Die Balken werden untereinander verdübelt oder mit Metallbändern gesichert.
e.A.	*eigene Abbildung*
fc	*Verschattungsfaktor*
fm	*Festmeter* gibt das Holzvolumen Rundholz an, das einem Kubikmeter entspricht.
FSC	Das *Forest Stewardship Council* wurde 1993 gegründet und ist eine internationale gemeinnützige Organisation, welche die Forderungen nach „nachhaltiger Bewirtschaftung“ der Wälder umsetzt.
GD	*Geschoßdecke*
GWP	Das *Global Warming Potential* ist das Treibhauspotential und ist ein Maß für die relative Klimawirksamkeit eines Gases.
_H	*Holzmassivbauweise*
_HV	*Holzmassivbauweise mit Vorsatzschalen*

[1] Zwiener und Mötzl 2006, Lohmann 2003

Holzfeuchte	Masse des im Holz enthaltenen Wassers ausgedrückt als Prozentsatz der Masse des darrtrockenen Holzes. $\omega\ [\%] = (m_\omega - m_0)/\ m_0 * 100$ m_ω ...Masse des Holzes vor der Trocknung m_0...Masse des Holzes nach der Trocknung
(I)	*Innenverschattung*
IBO	*Österreichisches Institut für Baubiologie und –ökologie,* Alserbachstraße 5/8, A-1090 Wien
IW	*Innenwand*
KVH	*Konstruktionsvollholz*, keilgezinktes und gehobeltes Nadelschnittholz. Durch die Keilzinkung können beliebig lange Elemente erzeugt werden.
_L	*Holzleichtbauweise*
_LV	*Holzleichtbauweise mit Vorsatzschalen*
_M	*Stahlbetonbauweise*
_MV	*Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschalen*
N	*Nacht*; in den Simulationen von 18:00-8:00 Uhr
NAWAROS	*Nachwachsende Rohstoffe*; zu ihnen zählen alle land- oder forstwirtschaftlich erzeugten Rohstoffe, die nach Aufbereitung einer technischen Anwendung zugeführt werden können. NAWAROS für die Energieerzeugung werden als Biomasse bezeichnet.
OSB	*Oriented Strand Board* ist eine Grobspanplatte mit 12-15 cm langen und flachen Spänen, die an den Deckschichten zu den Außenkanten ausgerichtet (oriented) sind.
(oV)	*ohne Verschattungseinrichtung*

PEI	Als *Primärenergiebedarf* wird die Energie bezeichnet, die zur Herstellung eines Produktes einschließlich Rohstoffgewinnung, Herstellung und Transport der Ausgangsstoffe benötigt wird. Ebenfalls enthalten sind Energieverluste, welche zum Beispiel durch Abwärme entstehen. Der PEI wird aufgeschlüsselt in PEI aus *erneuerbaren Energieträgern* (PEI e) und PEI aus *nicht erneuerbaren Energieträgern* (PEI ne).
PEI e	*Primärenergiebedarf erneuerbarer* Energien, siehe PEI
PEI ne	*Primärenergiebedarf nicht erneuerbarer* Energien, siehe PEI
s.a.	*sine anno*; fehlendes Erscheinungsjahr
s.l.	*sine loco*; fehlender Erscheinungsort
T	*Tag*; in den Simulationen von 8:00-18:00 Uhr
Ta	*Außentemperatur*
TAV	Die *Temperaturamplitudendämpfung* ist das Verhältnis der maximalen Erwärmung der äußeren zu der inneren Bauteiloberfläche.
Ti	*operative (gefühlte) Innentemperatur*
(V)	*Vorsprung*
V	*Vorsatzschale*
Vollholz	Vollholz bzw. *Massivholz*; durchgehendes Holz in seinem natürlichen Gefüge. Holzwerkstoffe wie Spanplatten, OSB-Platten, Faserplatten oder Konstruktionsvollholz (KVH) werden im Gegensatz dazu durch Zerlegen und anschließendes Zusammenfügen der Teile hergestellt.
Zopfdurchmesser	Durchmesser am dünneren Ende des Stammes.

Einleitung

1. Einleitung

Das erste Passivhaus wurde 1991 in Darmstadt-Kranichstein (Deutschland) von Dr. Wolfgang Feist geplant (Feist 2006). Heute, 2009, 18 Jahre später ist es nahezu Stand der Technik und zumindest in den meisten Bundesländern für das Erreichen der höchsten Förderstufen erforderlicher Baustandard. Die Anzahl der gebauten Passivhäuser in Österreich stieg über die Jahre hinweg exponentiell an. Laut IG Passivhaus soll sich dieser Trend auch in Zukunft fortsetzen (Abbildung 1).

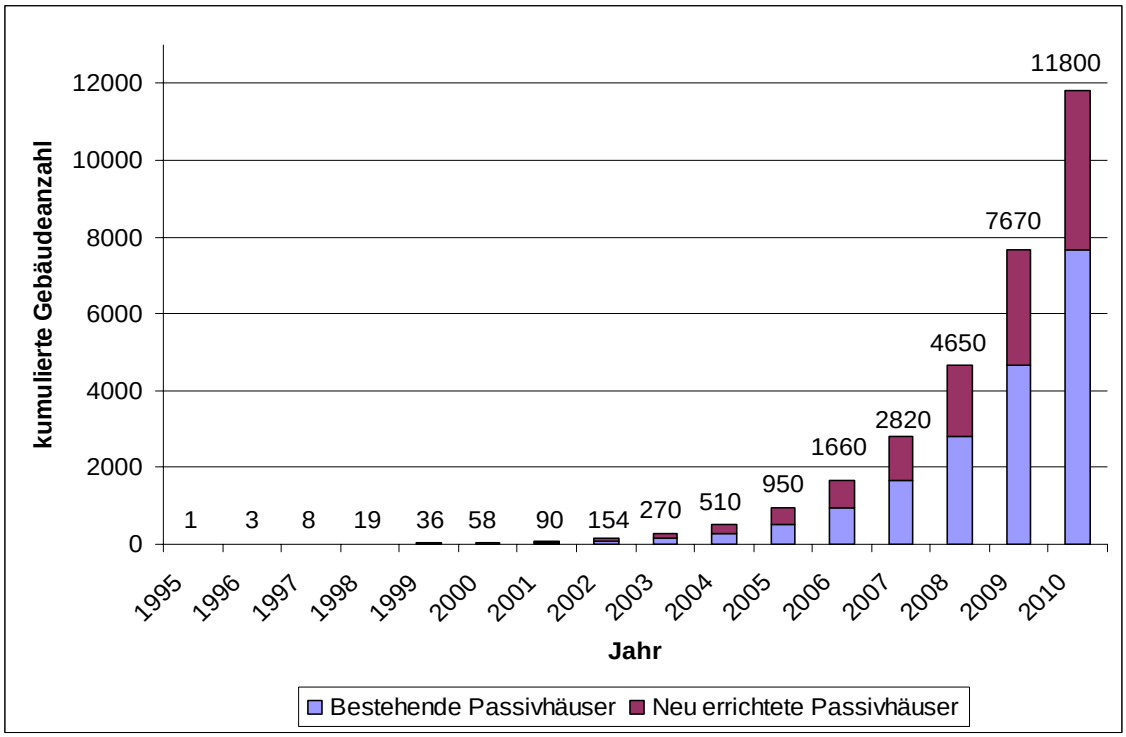

Abbildung 1: Passivhausentwicklung in Österreich von 1995 - 2010 (e.A. nach IG Passivhaus Österreich 2009)

Der erhöhte Ressourcenbedarf für die Herstellung eines Passivhauses gegenüber dem eines herkömmlichen Gebäudes liegt bei maximal 3%. Dieser Mehraufwand gegenüber einem herkömmlichen Haus kompensiert sich innerhalb von sehr kurzer Zeit durch die um den Faktor 10 niedrigeren Betriebsaufwendungen beim Passivhaus (Fechner et al. s.a. a).

Dennoch verbraucht das Bauwesen derzeit etwa 50% aller auf der Welt verarbeiteten Rohstoffe. In den Industrienationen verursacht das Bauwesen etwa 50% des Verkehrs. Etwa 40% der Gesamtenergie werden für den Betrieb von Gebäuden verbraucht. Hoch- und Tiefbau sind zu etwa 60 % am Abfallaufkommen beteiligt. Bis 2030 wird eine Steigerung des Weltenergiebedarfs um 60% erwartet (Hegger et al. 2008).

Mit Hilfe von **Ökobilanzen** ist es möglich, eine Abschätzung der mit dem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen potentiellen Umwelteinwirkungen zu treffen (Zwiener und Mötzl 2006).

Zum Bespiel ist es damit möglich, den Primärenergiebedarf (PEI) zu ermitteln, welcher für die Erstellung eines Gebäudes notwendig ist.

Als **Primärenergiebedarf (PEI)** wird die Energie bezeichnet, die zur Herstellung eines Produktes einschließlich Rohstoffgewinnung, Herstellung und Transport der Ausgangsstoffe benötigt wird. Ebenfalls enthalten sind Energieverluste welche zum Beispiel durch Abwärme entstehen. Der PEI wird aufgeschlüsselt in PEI aus erneuerbaren Energieträgern (PEI e) und PEI aus nicht erneuerbaren Energieträgern (PEI ne) (Zwiener und Mötzl 2006).

Bei einem Passivhaus entfallen 32 % des kumulierten Primärenergiebedarfs auf den Neubau, 18 % auf Abbruch und Entsorgung und 50 % für den Betrieb der Heizung (mit Gas) auf 80 Jahre kumuliert gerechnet. Neubauten aus den 1990er Jahren (Jahresheizwärmebedarf: ~ 115 kWh/(m²a)) benötigen während einer zugrunde gelegten Lebensdauer von 80 Jahren die neunfache Energiemenge, Niedrigenergiehäuser (Jahresheizwärmebedarf: ≤ 70 kWh/(m²a)) die fünffache Energiemenge und Passivhäuser (Jahresheizwärmebedarf: ≤ 15 kWh/(m²a)) die gleiche Heizenergiemenge wie für Herstellung, Abbruch und Entsorgung erforderlich sind (Abbildung 2) (Treberspurg et al. 2006).

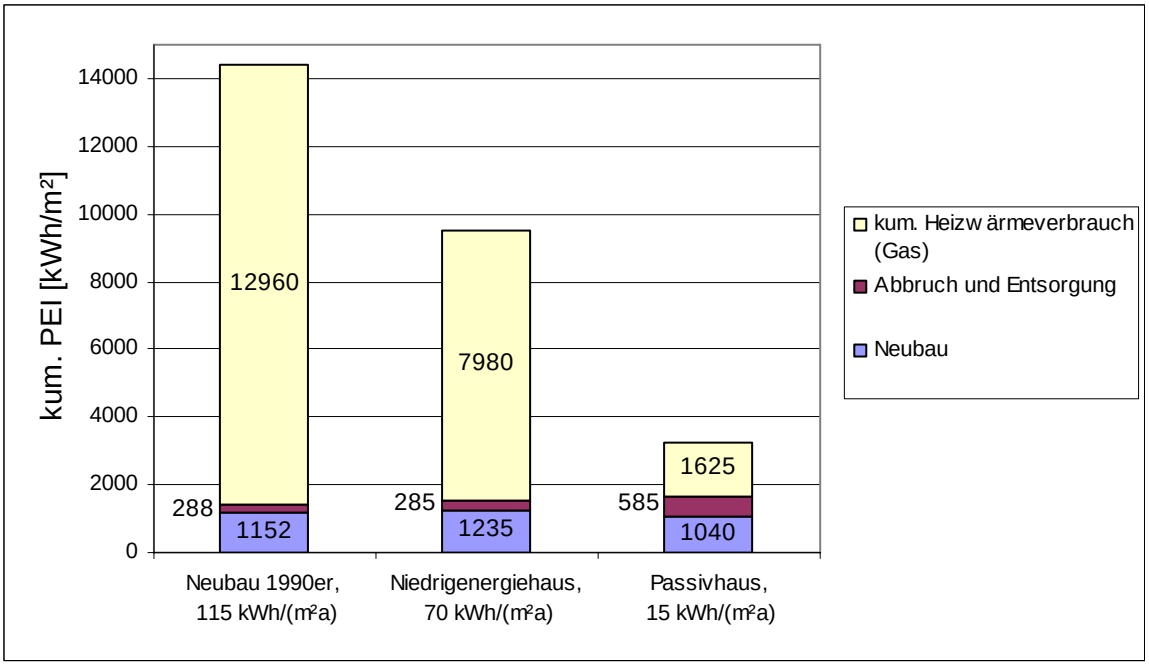

Abbildung 2: Lebenszyklusanalyse von verschiedenen Gebäudestandards über eine Lebensdauer von 80 Jahren. (e.A. nach Treberspurg et al. 2006).

Mit dem Passivhauskonzept ist es gelungen, den Heizwärmeverbrauch auf ein Minimum zu senken (Abbildung 2).

Betrachtet man dagegen den kumulierten Primärenergiebedarf für die Gebäuderichtung sowie den Abbruch und die Entsorgung der Gebäude, hat sich mit der Entwicklung vom Haus im Bestand bis hin zum Passivhaus keine nennenswerte Änderung ergeben.

Damit in Zukunft das nächste Kapitel des ressourcenorientierten Zeitalters im Bauwesen geschrieben werden kann, ist es unbedingt nötig, verstärkt regional verfügbare nachwachsende Rohstoffe (NAWAROS) zu nutzen.

Bei Baustoffen aus NAWAROS wird ein Teil des Herstellungsaufwands der Natur überlassen. Durch die Photosynthese werden aus Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) mit der Hilfe von Sonnenlicht Glukose ($C_6H_{12}O_6$) und als Abfallprodukt Sauerstoff (O_2) und Wasser (H_2O) produziert. Die Glukose wird zum einen für die Generierung von Zellmaterial (Zellulose, Hemizellulose und Lignin) verwendet und zum anderen unter Energiegewinn in den Zellen (unter Sauerstoffverbrauch) veratmet (Böhlmann 2008).

Damit erfolgt auch die Herstellung der Gebäudekomponenten zum Teil „passiv“.

Rohstoffe aus nachwachsende sind eine Voraussetzung dafür, dass Passivhauskonzepte in der Zukunft noch wirksamer zum Umweltschutz beitragen (Fechner et al. s.a. a).

Im Folgenden wird ein Überblick über die ökologischen Kennwerte von Baustoffen gegeben. In Abbildung 3 sind die ökologischen Kennwerte von Metallen aufgelistet, in Abbildung 4 die von gängigen Baustoffen. Man beachte, dass sich die Werte der Abszisse um den Faktor 100 zwischen Metallen und den gängigen Baustoffen unterscheiden. Die Werte zu den Abbildungen sind in Tabelle 25 dargestellt.

Neben den schon oben erwähnten PEI wird in den gängigen Ökobilanzen auch noch das Global Warming Potential (GWP) = Treibhauspotential und das Acidification Potential (AP) = Versäuerungspotential angegeben.

Das **Treibhauspotential (GWP)** ist ein Maß für die relative Klimawirksamkeit eines Gases. Bezugsgröße ist das wichtigste Treibhausgas Kohlendioxid, dessen GWP-Wert mit 1 festgelegt ist. Die GWP-Werte hängen von der Wärmeabsorbtionseigenschaft der Gase und ihrer Verweildauer in der Atmosphäre ab (Zwiener und Mötzl 2006).

In dieser Arbeit beziehen sich die GWP-Werte auf einen Zeitraum von 100 Jahren = GWP100.

Analog zum Treibhauspotential gibt das **Versäuerungspotential (AP)** die Tendenz einer Komponente säurewirksam zu werden an. Es wird relativ zum Schwefeldioxidgehalt angegeben und für jede säurewirksame Substanz eine Äquivalenzmenge Schwefeldioxid in Kilogramm umgerechnet (Zwiener und Mötzl 2006).

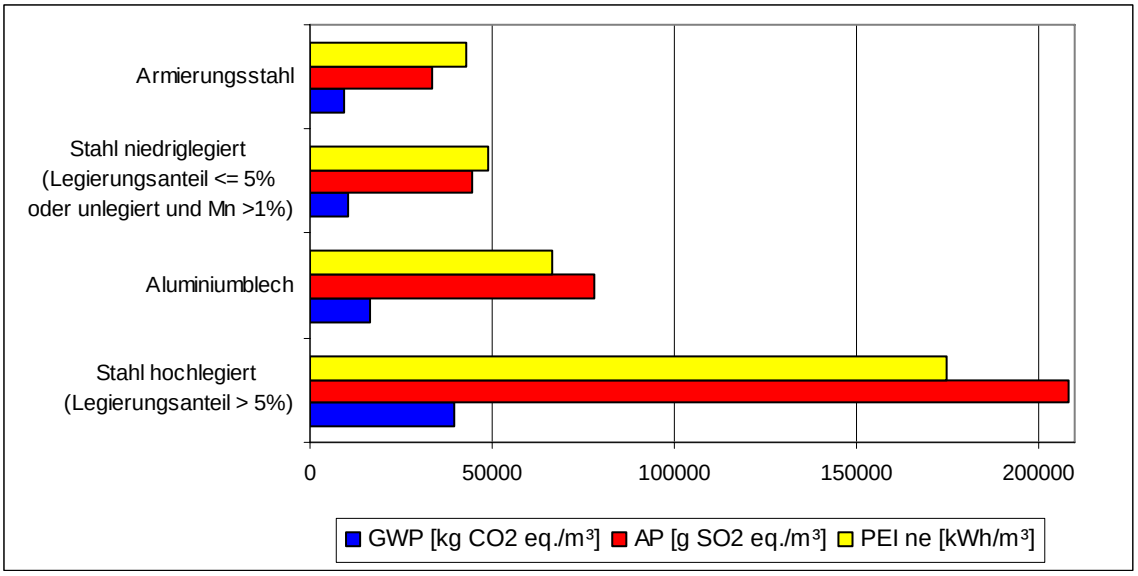

Abbildung 3: Ökokennzahlen GWP, AP und PEI ne für Metalle (e.A. nach Mötzl 2009).

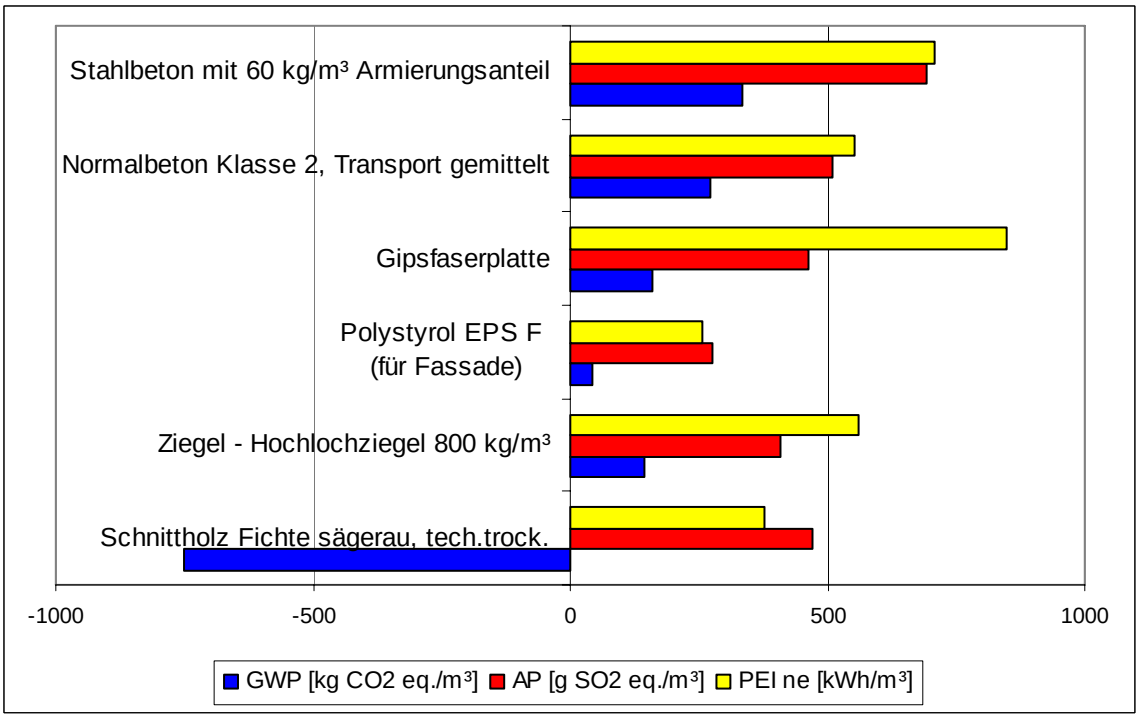

Abbildung 4: Ökokennzahlen GWP, AP und PEI ne für Baustoffe (e.A. nach Mötzl 2009).

Wie Abbildung 4 zeigt, ist Holz der einzige Baustoff, der einen negativen GWP-Wert aufweißt. Die negativen GWP-Werte des Holzes resultieren aus dem Umstand, dass der Baum während seiner Lebensdauer CO_2 aufnimmt und dieses in Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O_2) aufspaltet. Der Kohlenstoff unter anderem auch für die Synthese von Holz, welches aus den Komponenten Zellulose, Hemizellulose und Lignin besteht, verwendet.

1 kg Holz besteht zu 50% aus Kohlenstoff (Fengel und Wegener 1989), der sich bei einer Oxidationsreaktion (verrotten, verbrennen) mit dem Sauerstoff der Luft verbindet und wieder CO_2 bildet. Ein Kohlenstoffatom hat ein relatives Atomgewicht von 12 mol (=100%), zwei Sauerstoffatome haben ein relatives Atomgewicht von 32 mol (=267%). Daraus resultiert, dass aus den 0,5 kg Kohlenstoff pro 1 kg Holz bei Verbrennung durch die Verbindung mit den zwei Sauerstoffatomen aus der Luft eine Masse von 1,835 kg CO_2 entsteht (= 0,50 kg * (2,67 + 1)).

Multipliziert man die 1,835 kg CO_2 mit einer durchschnittlichen Dichte von 540 kg/m³ für Nadelholz erhält man einen Wert von 991 kg CO_2, welcher pro 1 m³ Holz gespeichert ist.

Dieser Wert nimmt mit der Anzahl der Verarbeitungsschritte bis zum fertigen Produkt ab, da sich die CO_2 Emissionen mit jedem weiteren Prozessschritt kummulieren, z.B. Transport, Einschnitt und Trocknung.

Motivation

2. Motivation

Der Holzbau hat in den letzten Jahrzehnten eine Renaissance erfahren, die sich bis heute fortsetzt. Neue Technologien in der Herstellung von Holzwerkstoffen ermöglichen eine Bauweise, die zum einen den Gesichtspunkten der modernen Architektur entspricht und zum anderen ohne Probleme die bauphysikalischen Vorraussetzungen, welche für das Betreiben von Passivhäusern nötig sind, erfüllen. Manchmal gerät dabei die ökologische Betrachtungsweise ins Hintertreffen, wenn nur noch der Funktion und dem Design Beachtung geschenkt wird. Oft ist es für den Endkunden nicht auf den ersten Blick ersichtlich, welche Baustoffe hinter der „natürlichen und gesunden Öko-Holzfassade“ verbaut wurden.

Die hier vorliegende Arbeit ist thematisch in zwei Teile gegliedert.

Im **ersten Teil** beschäftigt sie sich mit **genagelten, geschraubten und gedübelten Massivholzbausystemen**.

Im **zweiten Teil** der Arbeit wird der **Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit** von Massivholz im Vergleich zu anderen Baustoffen **auf die Raumtemperatur unter dynamischen Bedingungen** dargestellt.

Der Grund für die Erstellung des ersten Teils der Arbeit war der Mangel an Literatur über die unterschiedlichen Arten von genagelten, geschraubten und gedübelten Massivholzbausystemen, die in Österreich produziert werden und auf dem Markt erhältlich sind.

Viele positive Eigenschaften werden dem Massivholz zugeschrieben, u.a. findet man immer wieder Verweise auf die ausgezeichneten feuchteregulierenden Eigenschaften und die hohe Wärmespeicherfähigkeit von Holz.

Zu der feuchteregulierenden Wirkung von Holz auf das Raumklima konnten keine Normen bzw. andere Regelwerke, welche einen Berechnungsvorgang dafür vorgeben, gefunden werden. In einer empirischen Untersuchung stellte Teischinger 1987 in seiner Dissertation Zusammenhänge zwischen Periodendauer der Feuchteschwankungen und der Eindringtiefe in die Holzoberfläche dar.

Die Berechnung der Wärmespeicherfähigkeit von ist in folgendem Normenwerk geregelt:

- ÖNORM EN ISO 13786: Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen – Berechnungsverfahren

Im Hochbau ist mit der Anforderung gegen die sommerliche Überhitzung die Wärmespeicherfähigkeit ein Thema welche in:

- ÖNORM B 8110-3: Wärmeschutz im Hochbau - Wärmespeicherung und Sonneneinflüsse
- ÖNORM EN ISO 13791: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren
- ÖNORM EN ISO 13792: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung von sommerlichen Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Vereinfachtes Berechnungsverfahren

behandelt werden.

Mit Hilfe einer bauphysikalischen Simulationssoftware ist es möglich, den Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit der raumabschließenden Materialien unter deren Auswirkung auf die Raumtemperatur unter dynamischen Bedingungen zu simulieren und auszuwerten.

2.1 Warum mit Holz bauen?

Holz ist einer der wenigen regenerierbaren heimischen Rohstoffe, welche im Moment ausreichend zur Verfügung stehen.

Die Fläche von Österreich beträgt 8,4 Mio. ha, wovon 3,9 Mio. ha (47,2%) mit Wald bedeckt sind. Die häufigste Baumart in Österreich ist die Fichte, welche auf 53,6 % der Waldfläche vorkommt (Lebensministerium 2009).

Damit liegt Österreich hinter Finnland und Schweden an 3. Stelle der waldreichsten Länder Europas (AEIOU 2009).

Der Holzvorrat in Österreich beträgt 1095 Mio. Vorratsfestmeter. Jährliche kommt ein Holzzuwachs von 31 Mio. Vorratsfestmeter hinzu. Genutzt werden davon lediglich 19 Mio. Vorratsfestmeter (Bundesministerium für Land- und Frostwirtschaft 2007).

Holz nimmt als Biopolymer durch seinen zellulären Aufbau eine Position zwischen den keramischen Baustoffen (hohe Dichte, hohe Wärmeleitfähigkeit) und den Dämmstoffen (niedere Dichte, niedere Wärmeleitfähigkeit) ein.

Bezüglich der Festigkeit hat Holz gegenüber den keramischen Baustoffen den Vorteil, dass es hohe Zugkräfte abtragen kann. Im Vergleich zu den metallischen Werkstoffen besticht Holz durch sein günstiges Festigkeits-Dichte Verhältnis und durch sein berechenbares Verhalten im Brandfall.

Mit der Reformierung der Bauordnungen hat Holz in Österreich eine angemessene Gleichstellung mit anderen Baustoffen erhalten. Diese Entwicklung wurde vor allem durch die neue europäische Sichtweise im Brandschutz ermöglicht, die das Hauptaugenmerk auf funktionale Leistungserbringung und nicht mehr auf die Brennbarkeit eines Baustoffes legt. Durch mehrere Gesetzesnovellierungen ist nun ein dreigeschossiger Holzbau bei offener Bauweise in fast ganz Österreich möglich. Die im April 2001 in Kraft getretene Novelle der Wiener Bauordnung lässt zum ersten Mal in Österreich sogar 5-geschoßige Holzmischbauten (vier Holzgeschoße auf einem mineralischen Sockelgeschoß) zu (Fechner et al. s.a. b).

Merl erhob 2005 in seiner Dissertation den Anteil an Holz, der in den Gebäuden der Stadt Wien verbaut ist, und konnte damit zeigen, dass etwa 8 Mio. t CO_2-Äqivalente langfristig in dem Baustoff Holz gespeichert sind. Wien emittiert im Jahr an die 9 Mio. t CO_2, d.h. ca. eine Jahresemission an CO_2 ist durch die Verwendung von Holz gebunden. Des Weiteren ergab die Arbeit von Merl, dass bei einer energetischen Verwertung des Holzes am Ende der Lebensdauer die siebenfache Menge an Fernwärme, welche pro Jahr in Wien erzeugt wird, generiert werden kann.

2.2 Warum Massivholz?

Die Tragwerksschicht besteht aus einer massiven, flächig wirkenden Platte bzw. Scheibe, welche statisch die eingeleiten Kräfte abträgt. Die Gebäudeaussteifung erfolgt durch das Tragwerk selbst. Diese massiven Tafeln können aus stabförmigen, flächigen bzw. kastenförmigen Elementen aufgebaut sein. Man erhält einen wärmebrückenfreien Aufbau durch ein unterbrechungsfreies Umschließen der Dämmung um die ganze Gebäudehülle.

Je nach Aufbau ist es auch möglich, optisch entwertetes Holz in den Mittellagen der Tragwerkschicht einzubauen. An den Sichtflächen wie an der Raumseite der Wände bietet sich die Möglichkeit, großflächig Massivholzsichtflächen auszubilden. Diese sind im Rahmen der technischen Möglichkeiten auf den Kundenwunsch abstimmbar und bilden bedingt durch die anatomische Struktur des Holzes einmalige ästhetische Kompositionen.

Betrachtet man die Ökobilanzen von Holz und Holzwerkstoffen, so sieht man, dass sich die Längen der Prozessketten, welche durchlaufen werden, stark in den Werten von PEI, GWP und AP widerspiegeln.

Deutlich erkennbar ist, dass sich Bindemittel in der Form von Klebstoffen und die Partikelgröße des Holzaufschlusses sehr stark auf den nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt auswirken. Die technische Trocknung wirkt sich nur im

geringen Maße aus, da die Wärmeenergie aus der Verbrennung von Restholz gewonnen wird und damit als erneuerbare Energiequelle gerechnet wird.

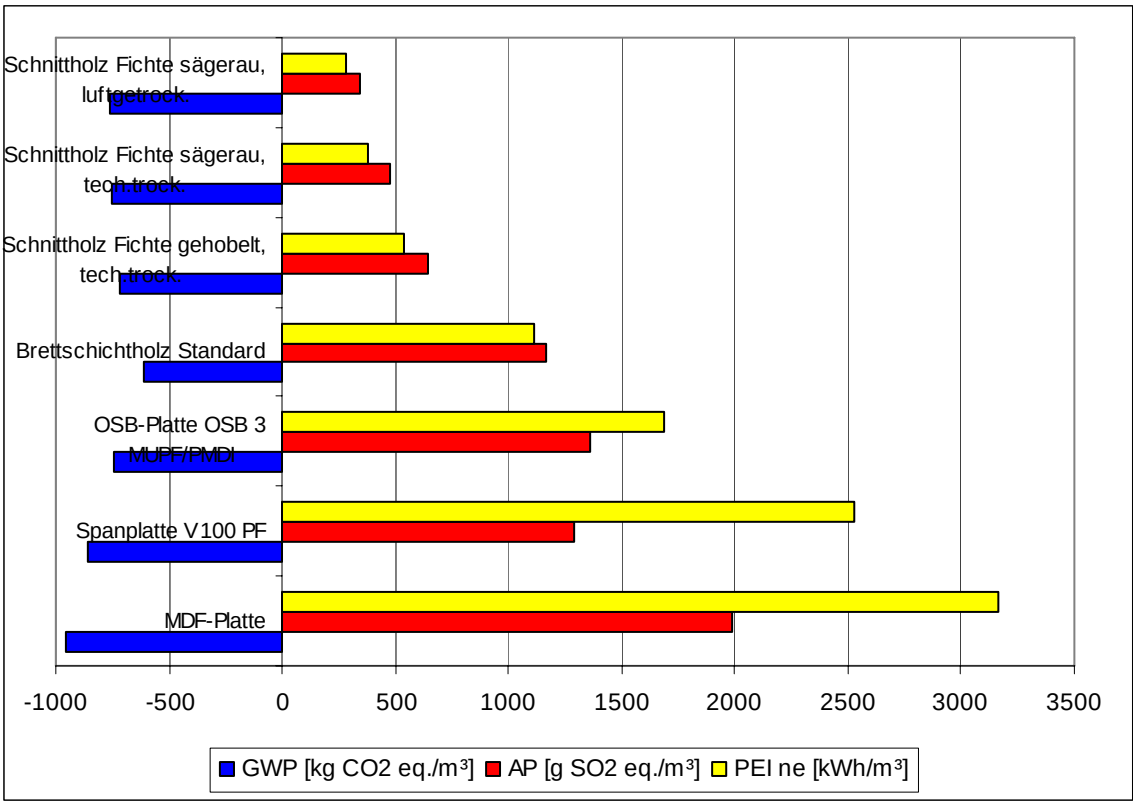

Abbildung 5: Ökokennzahlen GWP, AP und PEI ne für Holz und Holzwerkstoffe (e.A. nach Mötzl 2009).

Der PEI ne veranschaulicht den benötigten Umfang der energetischen Ressourcen zur Herstellung des Baustoffes. Technisch getrocknetes und gehobeltes Vollholz benötigt nur einen Bruchteil des PEI ne gegenüber Holzwerkstoffen. Ähnliche Tendenzen sind in den Werten des AP erkennen, wobei mit steigender Anzahl an Prozessschritten Energie- und Materialverbrauch steigen (Abbildung 5). Der GWP verhält sich ebenfalls proportional zum PEI und AP, dies ist in Abbildung 5 nicht auf den ersten Blick ersichtlich, da die Einheiten auf das Volumen (m³) bezogen sind und Holzwerkstoffe eine bis zu 50% höhere Rohdichte aufweisen als Schnittholz. Die Werte der Grafiken sind in Tabelle 25 aufgelistet.

2.3 Warum nur genagelte, geschraubte und gedübelte Systeme?

Abbildung 5 demonstriert, dass sich nicht nur die Partikelgröße der Holzwerkstoffe stark auf den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf auswirken, sondern auch die Menge an enthaltenen Bindemitteln. Alle konventionell in der Industrie eingesetzten Klebstoffe wie Harnstoff-Formaldehyd, Melamin-Formaldehyd und Isocyanate basieren auf Kohlenwasserstoffprodukten.

Brettsperrholz bzw. Kreuzlagenholz wird als ökologischer und naturfreundlicher Baustoff seit einigen Jahren von vielen großen Herstellern vermarktet. Die Firma KLH berichtet auf ihrer Homepage, dass pro 1 m² Leimfuge 0,2 kg Polyurethan Klebstoff benötigt werden. Standardmäßig werden Platten mit 3 Schichten (0,4 kg Klebstoff pro 1 m² Brettsperrholz), 5 Schichten (0,8 kg Klebstoff pro 1 m² Brettsperrholz) und 7 Schichten (1,2 kg Klebstoff pro 1 m² Brettsperrholz) hergestellt (KLH 2009).

Schon für ein Einfamilienhaus werden einige hundert Kilogramm Klebstoff verbraucht. Die Einsatzmöglichkeiten von verleimten Brettsperrholz bzw. Kreuzlagenholz sind ohne Zweifel enorm vielseitig, was u.a. darauf basiert, dass Klebeverbindungen als statisch steife Verbindungen in Rechnung gestellt werden. Damit sind beispielsweise auskragende Platten ohne Probleme realisierbar. Fraglich ist, ob in den meisten Fällen nicht andere, umweltfreundlichere Systeme ausreichen würden.

Holzbauweisen

3. Holzbauweisen

Sucht man in der deutschsprachigen Literatur nach einer Systematik, welche die einzelnen Bauweisen beschreiben, trifft man auf teilweise recht unterschiedliche Bezeichnungen.

Ein Grund dafür ist, dass es unterschiedliche Zuordnungen der einzelnen Bauweisen gibt, die untereinander nicht vergleichbar sind, da sie anderen Terminologien folgen. Dadurch sind im allgemeinen Sprachgebrauch für ein und dieselbe Bauweise ähnlich lautende oder gar völlig konträre Bezeichnungen in Verwendung.

Trotz der unterschiedlichen Bezeichnungen können durch folgende Merkmale die Bauweisen klassifiziert werden (Winter et al. 2001).

- Tragstruktur
- Verbindungstechnik
- Verwendete Holzquerschnitte
- Vorfertigungsgrad
- Montageprinzip

3.1 Geschichtliche Entwicklung

Bauweisen mit Holz dürften einer der ältesten Konstruktionsweisen für Gebäude gewesen sein. Neben der einfachen Methode des **Blockbau**s (Abbildung 7), welcher durch das waagerechte Aufeinanderlegen von Holzstämmen entsteht, wurden bereits sehr früh Rundhölzer als senkrechte Stützen in den Boden eingegraben. Durch das Einlegen von waagerecht liegende Dachriegeln in die noch oben zeigenden Astgabeln entstand der **Pfahlbau** (Abbildung 8). Die Bereiche zwischen den Stützen wurden mit Geflechten aus Zweigen mit einem Anstrich aus Lehm ausgefacht. Aus dieser ursprünglichen Bauweise aus Holz entwickelte sich der Fachwerkbau (Abbildung 6) (Schober 2002).

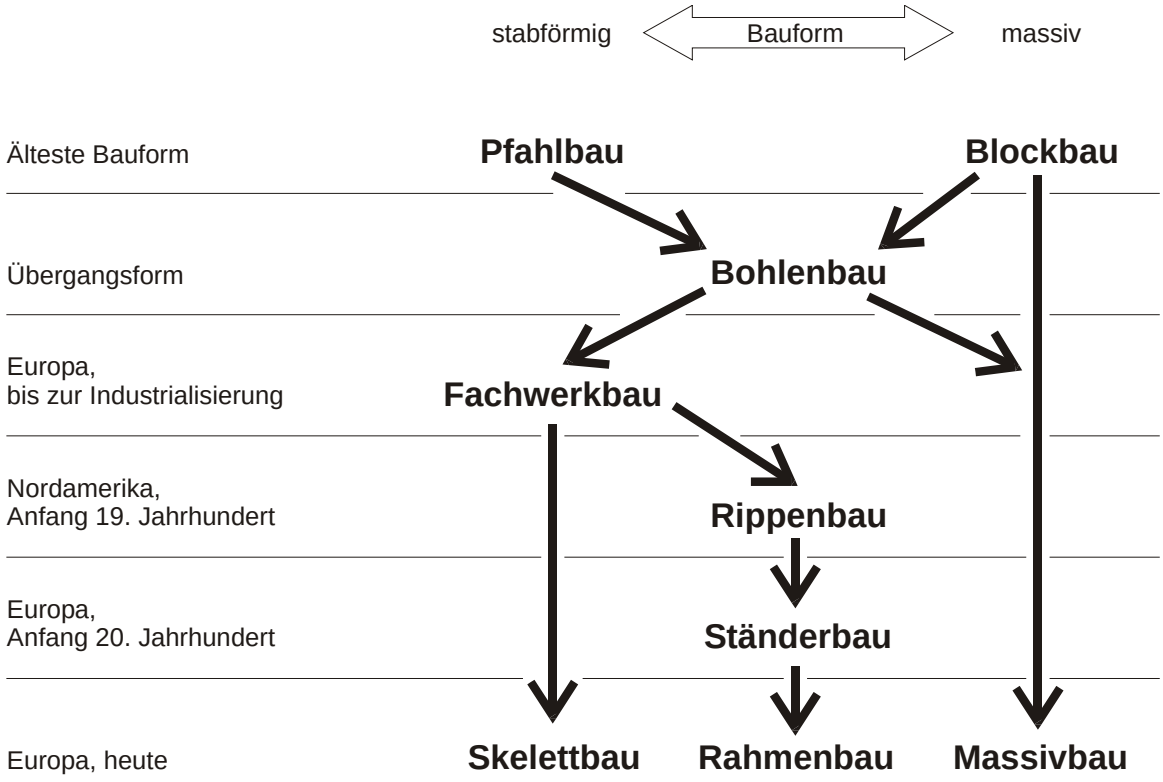

Abbildung 6: Entwicklung der Holzbauweisen (e.A. nach Schober 2002)

Eine Mittelstellung zwischen dem stabförmigen Pfahlbau und dem massiven Blockbau nimmt der **Bohlenbau** (Abbildung 9) bzw. Bohlenständerbau (Pfostenständerbau) ein.

Bohlenständerbau (Pfostenständerbau) bezeichnet eine Bauweise, bei der die Blockbohlen in einen Rahmen aus Ständern und einen durchgehenden Rähm eingefasst sind. Die komplizierten Eckverbindungen entfallen und das Setzen der Bohlen wird durch die Nut gesichert (Hähnel und Hähnel 2007).

Der deutsche **Fachwerkbau** (Abbildung 10) hat sich aus dem Bohlenständerbau entwickelt (Schober 2002). Fachwerkwände bestehen aus einem in sich unverschiebbaren Kantholzgerippe und werden als Außen- und Innenwände ausgeführt. Alle statisch wirksamen Kräfte werden durch die Stäbe abgeleitet. Die ausgemauerten Ausfachungsräume sind statisch unbedeutend. Die ausgeführten Holzverbindungen können Druckkräfte, nicht jedoch Zugkräfte von Stab zu Stab übertragen. Als Verbindungen der Stäbe untereinander dienten früher teilweise recht komplizierte und auch schmückende mit Holznägeln gesicherte Holzverbindungen (Kolb 2008).

In Nordamerika setzte sich im 19. Jahrhundert zum einen im Zuge der industriellen Fertigung von Nägeln zum anderen durch den großen Bedarf nach rasch zu erstellenden Gebäuden der **Rippenbau** durch. Im Wesentlichen ist der Rippenbau durch engmaschig gestellte Stützen, die die Vertikalkräfte ableiten, und einer horizontalen oder diagonalen Verschalung, die zur Aussteifung des

Traggerüstes dient, charakterisiert. Mit der Zeit haben sich die zwei Konstruktionsarten Ballon und Platform-Frame durchgesetzt (Kolb 2008).

Bei der *Balloon-Frame* Bauweise (Abbildung 11) laufen die Wandrippen über zwei oder mehr Geschosse durch. Den unteren und oberen Anschluss bilden horizontale Bretter und die Deckenträger sind mit Ausklingungen in die Wandrippen eingelassen (Kolb 2008).

Die Charakteristik der *Platform-Frame* Bauweise (Abbildung 12) ist die geschossweise Konstruktion der Wandelemente. Das Gebäude wächst etagenweise in die Höhe, die Decke bildet gleichzeitig die Arbeitsplattform für das nächste Geschoss (Ambrozy und Giertlová 2005).

Angeregt durch die amerikanischen Erfahrungen und Erfolge entstanden auch in Europa Ende der Zwanziger Jahre des vorigen Jahrhunderts die ersten nach den amerikanischen Vorbildern übernommenen Systeme mit der Bezeichnung Ständerbauten (Kolb 2008). Damit wurde der von Europa nach Nordamerika exportierte Fachwerkbau, der der Begründer für die Rippenbauweise war, wieder nach Europa in der Form des **Ständerbau**s importiert. Merkmale des Ständerbaus sind der geringe Vorfertigungsgrad, der große Arbeitsaufwand auf der Baustelle, der enge Stützenabstand sowie Verbindungsmittel des Ingenieurholzbaus und Dämmstoffe als Ausfachungen. Durch den geringen Vorfertigungsgrad dauert die Montage auf der Baustelle sehr lange und es muss dem Witterungsschutz Rechnung getragen werden (Kolb 2008, Hähnel und Hähnel 2007).

Durchgesetzt hat sich die Bauweise in den letzten zwei Jahrzehnten erst durch die Weiterentwicklung vom Ständerbau zum vorgefertigten Holzrahmenbau (Kolb 2008). Der wesentliche Unterschied vom Ständerbau zum Holzrahmenbau ist, dass beim **Rahmenbau** (Abbildung 13) die Vorfertigung im Allgemeinen aus einem tragenden Rahmen besteht. Dieser setzt sich aus zwei vertikalen Stielen, welche auf der Unterseite durch eine Fußschwelle und auf der Oberseite durch eine Kopfschwelle begrenzt sind, zusammen. Einseitig wird der tragende Holzrahmen mit einer aussteifenden Beplankung, meist aus Holzwerkstoffplatten, versehen. Die einzelnen Wandelemente werden auf der Baustelle auf einem vorher nivellierten Schwellenkranz montiert und kraft- und formschlüssig untereinander verbunden (Lohmann 2003).

Im Laufe des letzten Jahrhunderts entwickelte sich aus dem Fachwerkbau der moderne **Skelettbau** (Abbildung 14). Eine Primärkonstruktion wird heute in großem Rasterabstand angeordnet. Dadurch können die Außen- und Innenwände in beliebiger Anordnung und Ausführung zwischen den Tragkonstruktionen eingesetzt werden. Diese Merkmale, die klare Trennung

zwischen tragender Konstruktion und raumabschließenden Wänden, definiert den modernen Skelettbau (Schober 2002).

Die moderne Form des **Holz-Massivbau**s (Abbildung 15) ist durch großformatige, tafelförmige Vollholzelemente gekennzeichnet. Das Kennzeichen der Holzmassivbauweise ist die Lastabtragung über ein massives großformatiges Holzbauteil und die klare Trennung der Dämmebene von der Tragstruktur (Schober 2002).

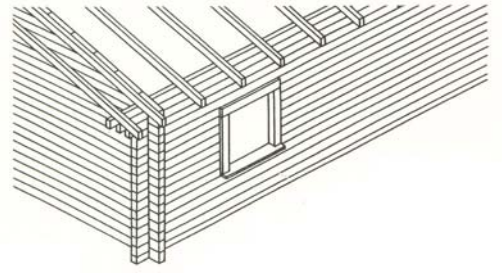

Abbildung 7: Blockbau (Schober 2002)

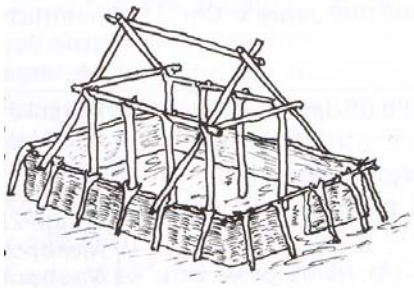

Abbildung 8: Pfahlbau (Albers 2001)

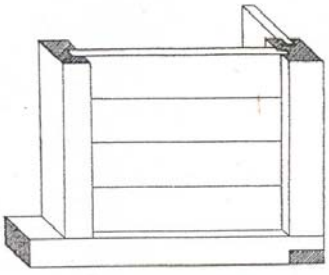

Abbildung 9: Detail Bohlenbau (Hähnel und Hähnel 2007)

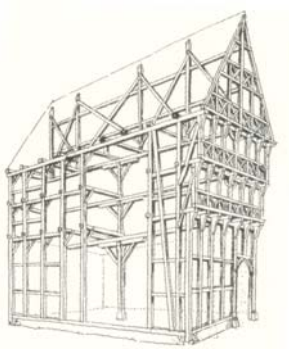

Abbildung 10: Fachwerkbau (Schober 2002)

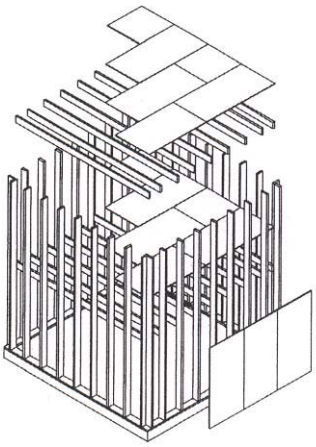

Abbildung 11: Rippenbau - Konstuktionsart Balloon-Frame (Ambrozy und Giertlová 2005)

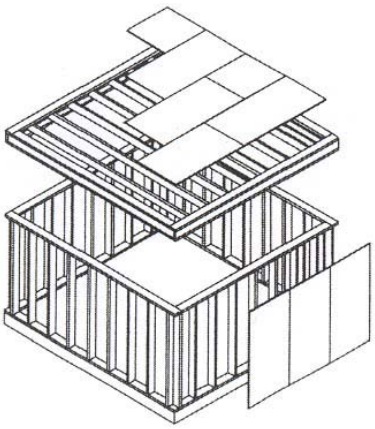

Abbildung 12: Rippenbau - Konstuktionsart Platform-Frame (Ambrozy und Giertlová 2005)

Abbildung 13: Rahmenbau (Kolb 2008)

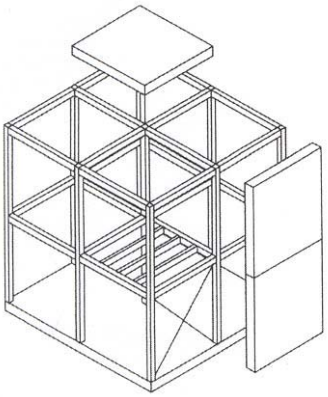

Abbildung 14: Skelettbau (Ambrozy und Giertlová 2005)

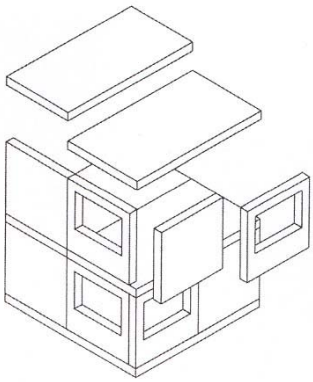

Abbildung 15: Holz-Massivbau (Tafelbauweise) (Ambrozy und Giertlová 2005)

3.2 Aktuelle Entwicklungen

Die Abbildung 16 versucht eine Übersicht über die aktuellen Holzbauweisen zu geben. Diese werden in drei Gruppen eingeteilt, den Rahmenbau, den Skelettbau und den Holzmassivbau. In der Grafik wird auch versucht den Vorfertigungsgrad durch die vertikale Achse anzudeuten.

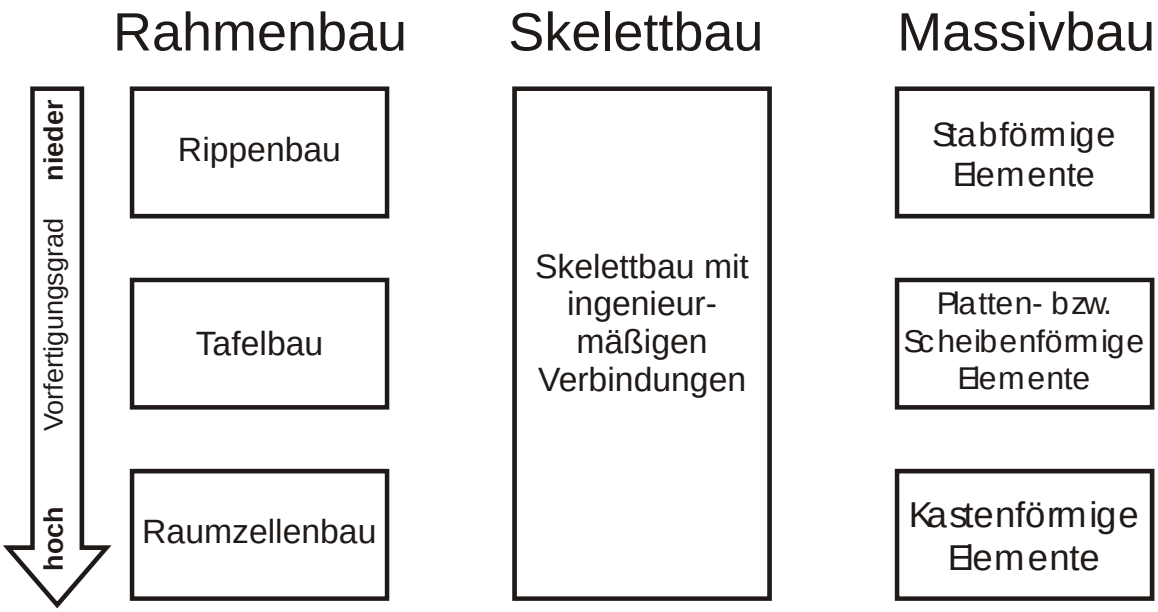

Abbildung 16: Aktuelle Entwicklungen der Holzbauweisen (e.A.)

3.2.1 Rahmenbauweise

Mit dem aufkommen der ersten Holzwerkstoffplatten setzte sich der Rahmenbauweise in Europa durch und ist im Moment noch immer die vorherrschende Bauweise im Holzbau (Schrentewein 2008; Schober 2002).

Pierer et al. (2000) definieren das wichtigste Merkmal des Rahmenbaus im Holzbau-Handbuch, den konsequenten geschossweisen Abbund (Platform-Frame), um ein gleichmäßiges Setzen gewährleisten zu können.

Der Rahmenbau ist weiters charakterisiert durch ein Holzgerüst aus standardisierten, meist industriell vorgefertigten Stützen welche unten auf einer Fußschwelle und oben mit einer Kopfschwelle verbunden sind. Diese Konstruktion übernimmt die vertikalen Lasten und leitet diese in den Untergrund ab. Im Laufe der Zeit hat sich ein Achsmaß von 62,5 cm durchgesetzt. Wärme- und schalltechnisch wirksame Dämmstoffe werden platzsparend in den Gefachen zwischen den einzelnen Stützen untergebracht. Als nächster Schritt wird innen eine Dampfbremse und außen eine Windsperre angebracht. Eine raumseitige Beplankung mit Holzwerkstoffplatten hat den Vorteil, dass diese die Funktion der Dampfbremse übernimmt. Erst durch die in der Regel beidseitig

ausgeführte Beplankung durch Holzwerkstoffplatten (Spanplatte, Oriented Strand Board (OSB-Platte), Sperrholzplatte etc.) oder Gipsplatten (Gipskarton- oder Gipsfaserplatte) aber auch aus Diagonalverschalung mit Brettern wie vor der Erfindung der Plattenwerkstoffe, können horizontal angreifende Kräfte in den Untergrund abgeleitet werden (Schrentewein 2008; Schober 2002). Des Weiteren dient die Beplankung als Aussteifung der unter Druck stehenden Rippen um diese vor Knicken und Kippen zu sichern (Pierer et al. 2000).

Die Verbindung der Schwellen mit den Stielen und die Befestigung der Beplankung erfolgt in der Regel mit mechanischen Verbindungsmittel (Schrauben, Rillennägel, Klammern) oder durch Verleimung (Pierer et al. 2000).

Aufgrund der geringen Holzquerschnitte des Rahmens und der niederen Druckfestigkeit quer zur Holzfaser ist dem Anschluss der Stützen zu Kopf- und Fußschwellen des Rahmenwerkes besonderes Augenmerk zu schenken. In diesem Bereich darf es zu keinen Verformungen und damit verbundenen Dimensionsänderungen der Schwellen kommen (Schober 2002).

Im mehrgeschossigen Holzbau werden die Querschnitte der Stützen in den untersten Geschossen primär nach diesem Gesichtspunkten bemessen (Hollinsky 2008)

Zur Rationalisierung bei der Herstellung von Gebäuden in Rahmenbauweise wird standardisiertes Schnittholz bzw. Plattenmaterial verwendet welches wiederholend eingesetzt wird zum Aufbau einfacher konstruktiver Details. Der Vorfertigungsgrad im Rahmenbau ist unterschiedlich. Begonnen mit dem einfachen ablängen, bohren und fräsen der Elemente, über das Zusammensetzen der Rahmen bis hin zum werkseitigen beplanken und ausfachen der Wandelemente. Die Grenzen zum Tafelbau verlaufen fließend, die Bauweisen unterscheiden sich nicht durch Konstruktionsgrundsätze sondern hauptsächlich durch den Grad der Vorfertigung (Stanek 2008).

3.2.1.1 Tafelbauweise

Die Herstellung der Tafeln erfolgt nach demselben Prinzip wie beim Rahmenbau, der einzige Unterschied besteht im Vorfertigungsgrad. Durch die Vorfertigung der kompletten Wandelemente in Werkshallen sichert den Einbau von Holz und Holzwerkstoffen mit den entsprechend zulässigen Holzfechtegrenzwerten sowie eine hohe Maßgenauigkeit. Der Vorfertigungsgrad reicht wie bereits besprochen vom Rohbauelement bis hin zum Tafelelement welches alle Installationen (Heizung, Elektro, Wasser etc.) die Außenfassade, Innenbekleidung und Fenster sowie Türen und Fenster enthält. Extrem kurze Montagezeiten auf der Baustelle sind damit garantiert.

Die Größe der Tafeln sind Abhängig vom Verwendungszweck werden aber primär limitiert durch die Transportmöglichkeit per LKW (Schober 2002, Pierer et al. 2000).

3.2.1.2 Raumzellenbauweise

Wird der Gedanke, der immer höheren Vorfertigung im Werk fortgeführt kommt man zur Raumzellenbauweise. Dabei werden ganze Raumelemente, also Boden, Wand und Decke beim Hersteller zusammengebaut, zur Baustelle transportiert und dort zusammengesetzt. Die Größe der Elemente ist wieder beschränkt durch den Transport. Diese Bauweise hat die kürzeste Montagezeit auf der Baustelle (Schober 2002, Pierer et al. 2000).

3.2.2 Ingenieurmäßiger Skelettbau

Im modernen Ingenieurholzbau werden Brettschichtholz und hochbelastbare Verbindungsmittel eingesetzt. Dies ermöglicht imposante und äußerst filigrane Holzskelette. Die Bauweise läst sich gut für den Wohnbau nutzen, da die Wände statisch unbelastet sind und so im Grundriss weitgehend frei gestellt werden können (Schober 2002).

3.2.3 Moderne Holzmassivbauweise:

Die Möglichkeit mit modernen Bearbeitungsmaschinen Holzprodukte schnell und mit hoher Präzision industriell zu fertigen, hat während der letzten Jahre zur Entwicklung und Einführung neuer Systeme geführt. Flächige, zugleich tragende und raumbildende Elemente ermöglichen vielseitige Anwendungsbereiche für Wände, Decken und Dächer. Die Bauteile bestehen aus Vollholz oder Konstruktionsvollholz (KVH) welches gesteckt, verleimt, gedübelt, genagelt oder geschraubt wird. Das Kernstück bilden stabförmige Elemente, geschlossene plattenförmige Querschnitte oder optimierte kastenförmige Elemente welche zu einem Flächentragwerk zusammengesetzt werden (Abbildung 17). Der Hauptteil des Tragsystems besteht aus einem tragenden Kern welcher in der Statik als Scheibe bzw. Platte wirkt (Kolb 2008).

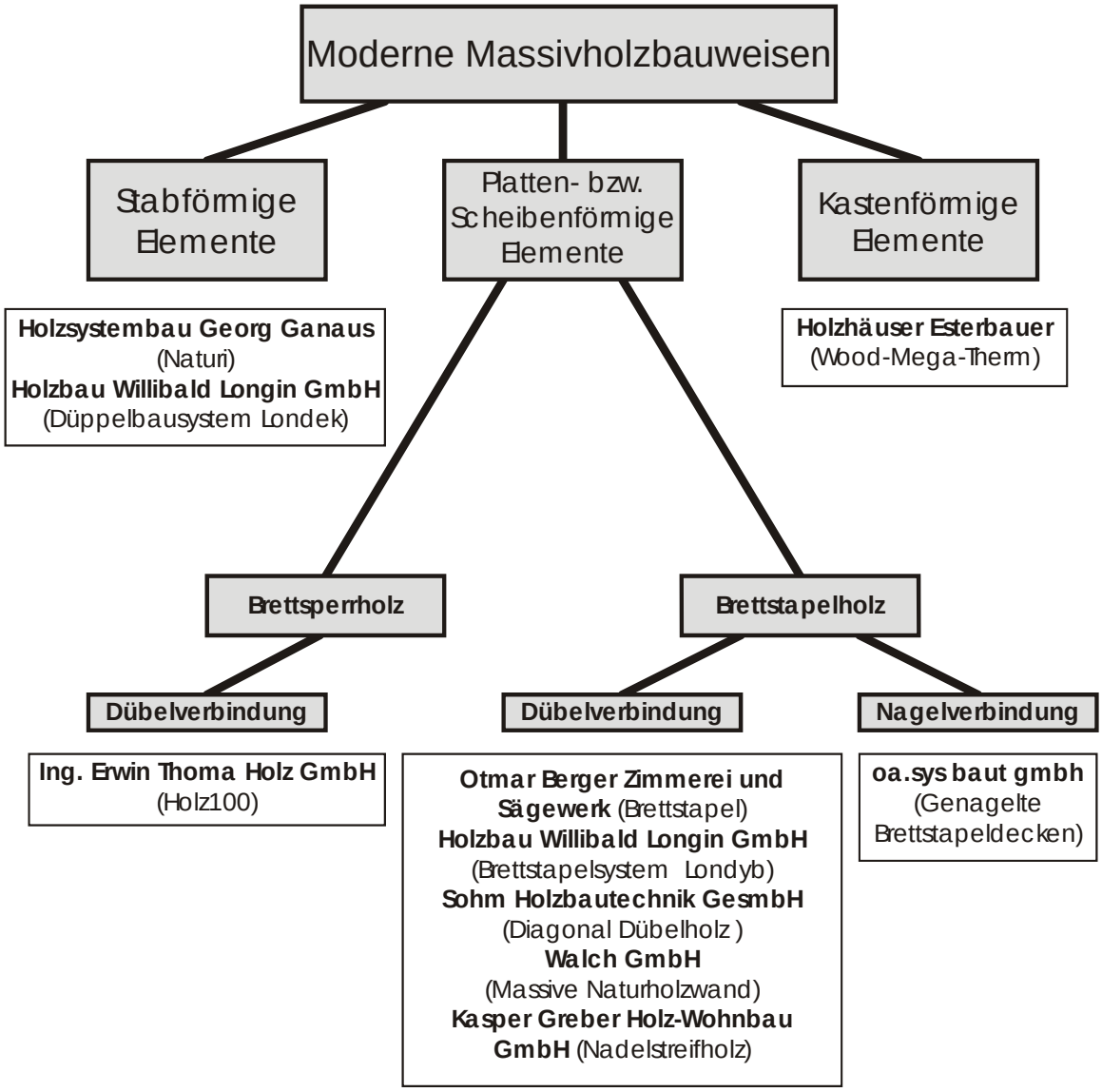

Abbildung 17: Einteilung der modernen Massivholzbauweisen und die Zuordnung der Unternehmen und ihrer Produkte (e.A.).

Die Forderung nach einer wind- und luftdichten Konstruktion wird je nach Konstruktionssystem und Wandaufbau unterschiedlich erfüllt. Manche Systeme bilden durch deren Aufbau schon eine dichte Konstruktion andere Systeme bedingen eine separate Luftdichtheitsschicht. Diese Luftdichtheitsschicht kann durch Holzwerkstoffplatten bzw. eigene Dichtfolien erreicht werden. Wie bei allen Bausystemen ist speziell auf die Anschlussdetails zwischen den einzelnen Elementen und Wand-Sockel, Wand-Decke, Wand-Dach zu achten. Des Weiteren sind die durchdringenden Bauteile wie Fenster, Türen und Kamine in Bezug auf die Luftdichtheit speziell zu betrachten. Die Wärmedämmung wird bei manchen Systemen entweder durch das Tragwerkselement, im Zusammenspiel von statisch tragenden Holz und Luftkammern, selbst erreicht bzw. durch auf die Außenseite aufgebrachte Dämmstoffe. Der Vorteil von außen liegenden, durchgehenden Wärmedämmungen, ist dass Wärmebrücken weitgehend

vermieden werden. Fast alle Hersteller bieten als Fassadenoptionen mineralische Putze und hinterlüftete Fassaden an (Kolb 2008).

Die Holzfeuchte der Bauteile hat beim Einbau der sich später einstellenden Ausgleichsfeuchte zu entsprechen. Im Wohnbau entspricht dies einer Einbauholzfeuchte von $\omega = 12 \pm 2$ % (Kolb 2008).

3.2.3.1 Stabförmige Elemente

Neue Systeme basieren auf den langjährigen Erfahrungen mit der Blockbauhaustechnik. Die aus horizontalen stabförmigen Elementen aufgebauten Blockhäuser haben zwei wesentliche Nachteile durch die man den Forderungen nach den heutigen Passivhäusern nicht gerecht werden kann. Da wäre einerseits das hohe Setzungsmaß (bis zu 10 cm pro Geschoss) durch die horizontal verbauten Stämme und andererseits die Luftdichtheit welche u.a. aus den durchlaufenden Nuten, den Eckverbindungen und den Anschlüssen resultiert. Alle diese Probleme hat Georg Ganaus mit seinem Naturi System durch rein konstruktive Maßnahmen kompensiert. Durch die profilierten Stämme mit geringem Querschnitt kann das Produkt ohne Kräne und sonstigen aufwendigen Hilfsmitteln auf der Baustelle vom Handwerker rasch verarbeitet werden.

3.2.3.2 Scheiben- bzw. Plattenförmige Elemente

Die ohne Hohlräume gefertigten Vollquerschnitte werden meist als großformatige Flächenelemente hergestellt welche als massive, flächige wirkende Scheibe oder Platte wirkt. Die Aussteifung des Gebäudes erfolgt wie die vertikale Lastabtragung über das Flächentragwerk welches gleichzeitig auch den Raumabschluss bildet. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf einlagig genagelten und gedübelten Brettstapelelementen sowie auf gedübeltem Brettsperrholz. Als Rohmaterial kommen dabei Lamellen aus Nadelholz zum Einsatz (Kolb 2008).

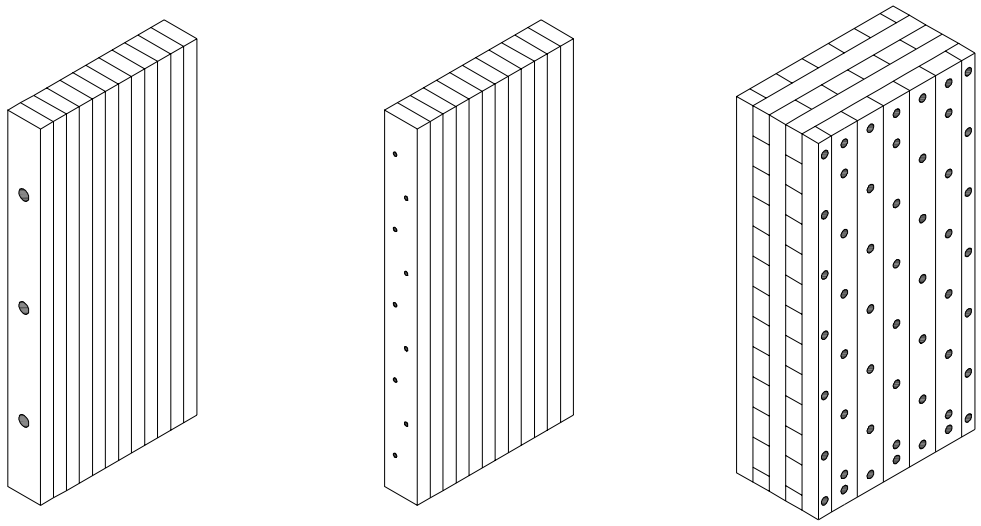

Abbildung 18: gedübeltes Brettstapelholz, genageltes Brettstapelholz und gedübeltes Brettsperrholz (e.A. nach Kolb 2008).

Im Werk werden die Wand und Decken inklusive aller Öffnungen passend und montagefertig abgebunden. Der Vorfertigungsgrad ist unterschiedlich je nach Firma und Auftrag und kann vom Rohbau der Einzelelemente bis zum voll ausgebauten Wandelementen mit Fenster und Türen reichen. Je höher der Vorfertigungsgrad desto kürzer ist Manipulationszeit auf der Baustelle.

Den Systemen in der Abbildung 18 liegt zu Grunde, dass sie als Sichtflächen auf der Innenseite des Bauteils ausgeführt werden können. Für Elektroinstallationen ist eine Ausfräsung in der Konstruktion oder eine vorgesetzte Installationsebene mit einem Lattenrost vorzusehen (Kolb 2008).

3.2.3.2.1 Brettstapelbau

Die Elemente des Brettstapelbau bestehen aus vertikalen Seitenwarenbrettern, stumpf gestoßen oder keilgezinkt, welches nebeneinander gestapelt und untereinander mit Hartholzdübeln (z.B. Buche mit einer niedrigeren Holzfeuchte als die Bretter), Nägel oder mit Leim verbunden wird.

Die so entstehenden Brettstapelelemente werden miteinander zu einen Tragwerk verbunden. Durch die senkrechte Anordnung der einzelnen Bretter im Wandelement sind die Schwind- und Quellverformungen in senkrechter Richtung gegenüber dem herkömmlichen Blockbau stark reduziert. Die Oberflächen können in Sichtqualität ausgeführt werden (Ambrozy und Giertlová 2005).

Vom Quell- und Schwindverhalten unterscheiden sich die verschiedenen Aufbauten sehr stark. Zum Beispiel Quellen genagelte und gedübelte Brettstapelelemente als ganzes Element. Hingegen schwindet bei gedübelten Brettstapeln jede Lamelle für sich, bei genagelten Brettstapeln schwindet

wiederum das ganze Element. Als eine konsequentes daraus, muss besonderes Augenmerk auf Querschnittsveränderungen, infolge von Luftfeuchte und Feuchteeinwirkung beim Bau durch Quell- und Schwindfugen berücksichtigt werden (Kolb 2008).

Bei Brettstapelelementen wird die Einbaufeuchte in der Regel etwas höher gewählt, bis maximal ω = 18 %. Das einzelne Brett quillt dann infolge der allfälligen Baufeuchte nicht (Kolb 2008).

3.2.3.2.2 Brettsperrholz

Der Brettsperrholzbau stellt gegenüber dem Brettstapelbau eine weitere Verbesserung der Holzmassivtechnik dar. Durch die kreuzweise Anordnung und Verleimung der Bretter werden die Schind- und Quellverformungen nochmals reduziert. Die Decklagen werden bei einigen Herstellern aus Einschichtplatten gefertigt und haben daher Sichtqualität. Für statische und brandschutztechnische Erfordernisse können die Decklagenstärker ausgeführt werden (Ambrozy und Giertlová 2005).

Gedübeltes Brettsperrholz ist gegenüber Quellen und Schwinden „gesperrt“ (daher der Name Sperrholz) durch die unterschiedliche Orientierung der Bretter in den einzelnen Schichten wird das anisotrope Verhalten von Holz stark gemindert.

3.2.3.3 Kastenförmige Elemente

Die Entwicklung von zusammengesetzten Querschnitten basiert auf der Überlegung, den Baustoff Holz nur dort einzusetzen, wo es nach statischer Notwendigkeit, konstruktiver Effizient und den Anforderungen nach Schall- und Brandschutz benötigt wird. Diese Überlegung führte zu kastenförmigen Elementen, welche aus zusammengesetzten Massivholzbauteilen wie Pfosten, Brettern, Stegen, Leisten oder Lamellen bestehen (Kolb 2008).

Wood Mega Therm, eine Entwicklung der Firma Esterbauer findet als Beispiel für derartige Konstruktionen in dieser Arbeit Erwähnung.

Die Verbindungen der einzelnen Konstruktionsteile erfolgt über Schrauben, Nägeln, Klammern bzw. Verklebung. Derart zusammengefügte Teile sind sehr maßstabil und lassen sich bezogen auf die Lastabtragung schlank halten. Die Stabilisierung erfolgt entweder durch die Elemente selbst oder es werden zusätzliche Bekleidungen oder Aussteifungsrippen angeordnet. In die Entstehenden Hohlräume können sowohl für die Wärmedämmung als auch für den Schallschutz und als Führungslinien für Rohrleitungen genutzt werden (Kolb 2008).

Massivholzbausysteme (genagelt, geschraubt, gedübelt)

4. Massivholzbausysteme (genagelt, geschraubt, gedübelt)

Im folgenden Kapitel werden österreichische Massivholzproduzenten, welche genagelte, geschraubte und gedübelte Produkte herstellen, kurz vorgestellt. Der Autor führte im Herbst 2008 eine Recherche durch und interviewte die in dieser Arbeit behandelten Massivholzproduzenten. Die Befragungen erfolgten persönlich, telefonisch bzw. per eMail. Die Auflistung der Firmen stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Die Auswahl der Unternehmen erfolgte nach folgenden Kriterien.

- Produktionsstandort in Österreich
- Das erzeugte Produkt besteht zum überwiegenden Teil aus Vollholz oder KVH.
- Die verwendeten Verbindungsmittel sind Nägel, Schrauben oder Dübel.

Nachfolgend werden die einzelnen Unternehmen vorgestellt, deren Standorte man Abbildung 19 entnehmen kann. Anfangs werden die Zahlen und Fakten sowie die Motivation zur Entwicklung der Massivholzsysteme dargestellt. Anschließend wird der Aufbau des Massivholzsystems und deren Einsatz als Wand- und Deckenelement erläutert.

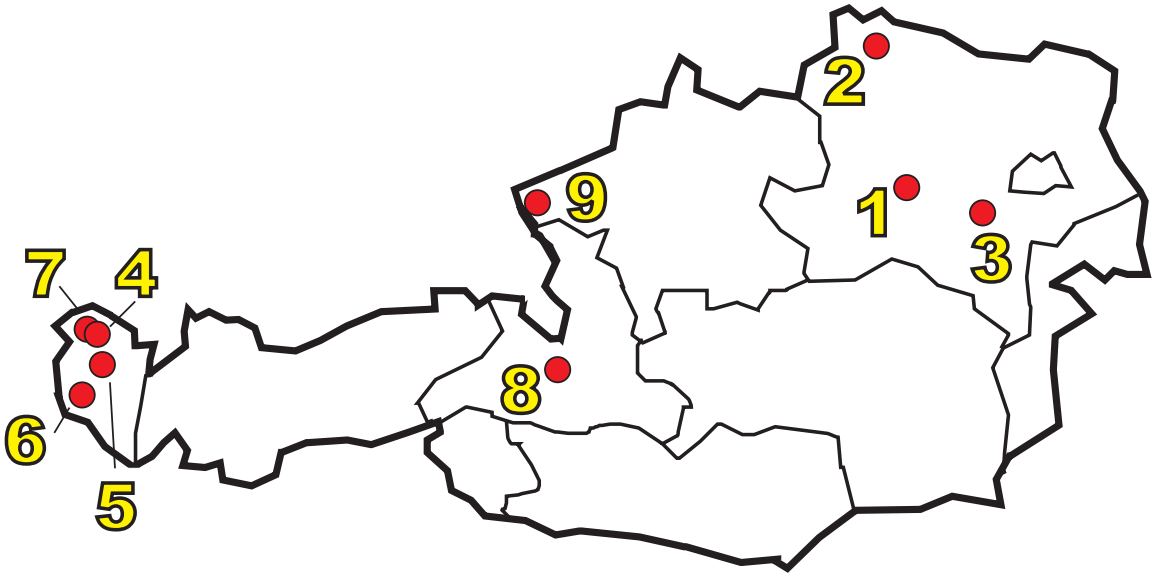

Abbildung 19: Standorte der Hersteller von genagelten, geschraubten und gedübelten Massivholzsystem (e.A.). Legende siehe Tabelle 1.

Aus Gründen des Umfanges wird auf nähere Details wie Eckverbindungen, Anschlüsse zu Fenstern und Türen sowie den Aufbau von Innenwänden nicht näher eingegangen.

Für den Aufbau der Wand- und Deckenelemente wurden Standardwerte der Hersteller herangezogen. Abweichende Kundenwünsche sind jederzeit von den Unternehmen realisierbar, da jedes Haus individuell geplant und gebaut wird.

Neben den vorgestellten Massivholzsystemen haben alle Unternehmen die klassischen Produkte und Dienstleistungen einer Zimmerei im Angebot. In der Region bieten die meisten Firmen auch den Service des Generalunternehmers an und arbeiten dafür mit lokalen Unternehmen der Bau- (Betonarbeiten), Elektro- und Installateurbranche zusammen.

Die Größe der produzierten Holzelemente vor allem bei den Platten- und Scheibenförmigen Elementen wird primär begrenzt durch die maximalen Abmessungen, welche mit einem Sattelschlepper transportiert werden können und nicht durch die Produktion. Diese liegen im Allgemeinen bei 2,8 m Höhe und einer Länge von 13,6 m.

Die Tabelle 1 zeigt in einer Überblicksdarstellung die wichtigsten Eigenschaften der verschiedenen Systeme.

Von den platten- und scheibenförmigen Elementen werden für den Einsatz als Wandelemente die Brettstapelsysteme in einen Holzrahmen eingesetzt. Die Brettstapel übernehmen die statische Lastabtragung; der Holzrahmen dient als Einfassung und garantiert die Passgenauigkeit zu den angrenzenden Bauteilen wie Boden, Decke und Wandelemente.

Die Außen- und Innenseite der Wände kann vielfältig gestaltet werden. Nahezu alle Unternehmen bieten für die Außenwand die Varianten mineralischer Putz und hinterlüftete Holzverschalung an. An der Innenseite ist Anzahl der Möglichkeiten nahezu unbegrenzt, angefangen von Holzverkleidung, Gipsfaser- und Gipskartonwänden bis hin zum Lehmputz(platten).

Tabelle 1: Überblick über die Massivholzproduzenten und deren Produkteigenschaften

						Bauteile			
Nr.	**Firma**	**Produkt**	**Elementart**	**Bezeichnung**	**Verbindung**	**Wand**	**Decke**	**Vollholz**	**KVH**
1	Holzsystembau Georg Ganaus	Naturi	Stab		gedübelt	**X**		**X**	
2	Holzbau Willibald Longin GmbH	Düppelbausystem Londek			geschraubt	**X**		**X**	
2	Holzbau Willibald Longin GmbH	Brettstapelsystem Londyb	Scheibe bzw. Platte	Brettstapel	gedübelt	**X**	**X**	**X**	
3	Otmar Berger Zimmerei und Sägewerk	Brettstapel				**X**	**X**	**X**	
4	Sohm Holzbautechnik GesmbH	Diagonal Dübelholz				**X**	**X**	**(X)***	**X**
5	Kasper Greber Holz-Wohnbau GmbH	Nadelstreifholz				**X**	**X**		**X**
6	Walch GmbH	Massive Naturholzwand				**X**	**X**		**X**
7	oa.sys baut gmbh	Genagelte Brettstapeldecken			genagelt		**X**	**X**	
8	Ing. Erwin Thoma Holz GmbH	Holz100		Brettsperrholz	gedübelt	**X**	**X**	**X**	
9	Holzhäuser Esterbauer	Wood-Mega-Therm	Kasten		geschraubt	**X**	**X**		**X**

***** auf Kundenwunsch möglich

4.1 Holzsystembau Georg Ganaus[2]

Oed 6 02755 / 48181

3241 Kirnberg an der Mank / NÖ www.naturi.at

Georg Ganaus gründete 2002 sein Unternehmen und vermarktet seit dem sein Produkt mit dem Namen Naturi. Das Ziel war, ein System zum Bau von Vollholzwänden anzubieten, das Setzungsfreiheit garantiert und mit dem beliebig dicke Wände mit einem einzigen Grundelement realisiert werden können.

Das Produkt Naturi ist durch ein europaweites Patent geschützt. Georg Ganaus und sein Bruder Christoph Ganaus bauen mit ihren 30 Mitarbeitern derzeit ca. 25 Einfamilienhäuser im Jahr. Ungefähr 80% des Firmenumsatzes wird durch das Naturi System erwirtschaftet. Im Jahr werden durchschnittlich 1000 Festmeter (fm) an Durchforstungsrundholz mit einem Zopfdurchmesser von 16 bis 17 cm für die Vollstäbe sowie ca. 1000 fm Starkholz für die Halbstäbe verarbeitet.

4.1.1 Naturi

Naturi ist ein steckbares Wandsystem, welches auf so genannten Voll- und Halbstäben basiert. Diese Vollstäbe (Abbildung 20) sind ähnlich wie bei einen Puzzlespiel gefräst, so dass sie stehend von der Seite zusammengefügt und mit Hartholzdübel fixiert werden können. So ist es möglich, Vollholzwände in beliebiger Dicke aufzubauen. Der Wandabschluss innen und außen erfolgt mit Halbstäben (Abbildung 21).

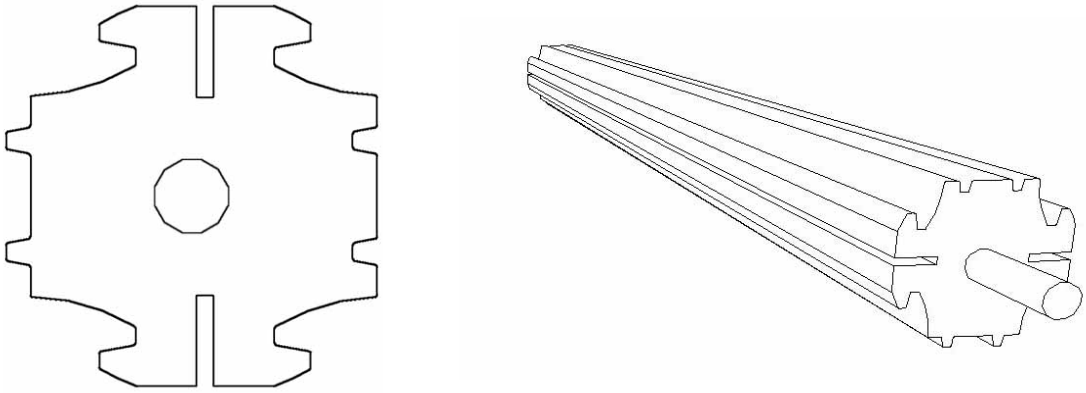

Abbildung 20: Vollstab – Querschnitt und 3D Ansicht (Kern 2009).

[2] Ganaus 2008

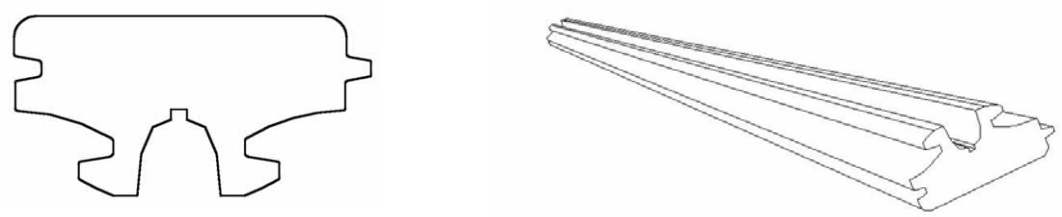

Abbildung 21: Halbstab – Querschnitt und 3D Ansicht (Kern 2009).

Eine Naturi-Wand mit einer Dicke von 30 cm (Abbildung 22) besitzt 9 Nut-Feder Verbindungen, damit ergeben sich 21 Überschneidungesebenen quer zur Wand- und Windrichtung.

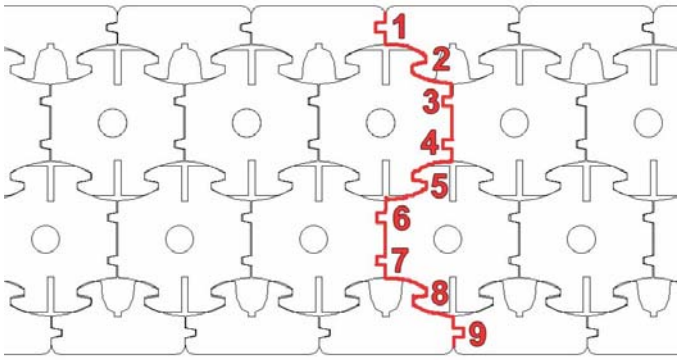

Abbildung 22: Querschnitt durch eine 30cm Naturi-Wand, 9 Nut-Feder Verbindungen quer zur Wind- und Wandrichtung (e.A. nach Kern 2009).

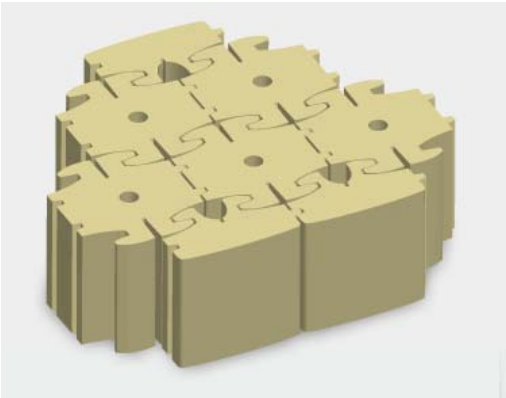

Abbildung 23: 30cm Naturi-Wand (3D Ansicht) (Ganaus 2008).

Die Vollstäbe werden vor dem profilgebenden Fräßvorgang mit zwei Einschnitten (Entlastungsnuten) versehen. Dies gewährleistet, dass die Rundhölzer während des Trockenvorganges nicht an unerwünschter Stelle aufreißen. Die Stäbe werden auf eine Holzfeuchte von 14 (±2) % herabgetrocknet.

Im verbauten Zustand trocknet das Holz nach wodurch eine Verspannung an den Federleisten erfolgt welche eine erhöhte Luftdichtheit gewährleistet (Abbildung 24).

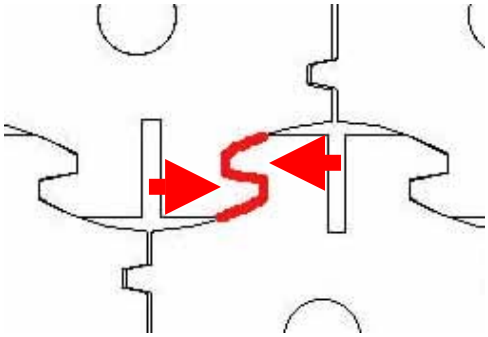

Abbildung 24: Federleisten drücken durch austrocknen die Nut Feder Verbindung aneinander (e.A. nach Kern 2009).

Je nach Wahl der Holzart für die Halbstäbe kann die Wand nach Kundenwunsch aufgebaut werden, zum Beispiel Lärchehalbstäbe an der Außenwand und Eichenhalbstäbe an der Innenwand.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde 2003 von Dorner eine Ökobilanz von Naturi erstellt.

4.1.2 Wandaufbau

Auf die Betonplatte bzw. Kellerdecke wird eine Grundschwelle nivelliert und darauf eine Systemschwelle gesetzt. Diese Systemschwelle besitzt 24 mm Bohrungen, in welche die 14 cm langen Hartholzdübel mit einem Durchmesser von 24 mm 9 cm tief eingeschlagen werden. Die Vollstäbe, welche eine Länge je nach gewünschter Raumhöhe aufweisen, enthalten an den Enden eine zentrische Bohrung (Durchmesser 25 mm) und werden auf die gelochte Systemschwelle aufgesetzt. Jeder Vollstab enthält auf die Länge 4 Bohrungen (Durchmesser 24 mm) quer zur Achse. Sobald drei Vollstäbe in einer Reihe stehen werden sie mit 22 cm langen Buchendübeln (Durchmesser 24 mm) verbunden. Am Kopfende der stehenden Vollstäbe werden diese ebenfalls mit einer gelochten Systemschwelle (wie die am Fußende) verdübelt.

Wie in Tabelle 2 zu sehen ist, besteht der Naturi - Wandaufbau nur aus Vollholz.

Die Halbstäbe enthalten zentrisch der Länge nach Elektroinstallationskanäle, damit ist es möglich, Steckdosen und Schalter in beliebiger Höhe zu setzen und die Leitungen nach oben bzw. unten zu führen.

Tabelle 2: Naturi-Wandaufbau mit 30 cm Dicke

Position	Dicke [cm]	Bauteilbezeichnung
1	30	Naturi Vollholzwandsystem bestehend aus 2 Vollstäben und 2 Halbstäben
Σ	**30**	**[cm]**
U-Wert	**0,3**	**[W/m²K]**

Das System Naturi wird ausschließlich zum Aufbau von Wänden eingesetzt.

Die Decken werden in den Naturi - Häusern üblicherweise aus Massivbalkendecken, in verschiedenen Optiken und Ausführungen, je nach Kundenwunsch gefertigt.

4.2 Holzbau Willibald Longin GmbH[3]

Siedlungsgasse 4 02843 / 2243
3843 Dobersberg / NÖ www.longin.at

Das Unternehmen Longin besteht seit 1958 als Zimmereibetrieb. Mit den Jahren wurde das Angebot dahingehend erweitert, dass Longin nun als Generalunternehmer im Bereich Holzhausbau auftritt. Seit 2000 werden die Massivholzsysteme Londyb und Londek erzeugt und vertrieben.

Longin verfügt über ein eigenes Sägewerk, in dem das gesamte Vollholz für die Produktion (ca. 5000 fm pro Jahr) selbst eingeschnitten wird. Die Hauptholzarten sind Fichte und Kiefer, im Jahr werden mit den ca. 50 Mitarbeitern 15 bis 20 Häuser, hauptsächlich in der Region, gebaut.

Der überwiegende Anteil der gebauten Häuser wird in Mischbauweise aus Holzrahmenbau und Brettstapelbau Londyb errichtet. Dort wo Holz im Endausbau als Sichtfläche vorhanden sein soll, wird die Brettstapelbauweise eingesetzt.

4.2.1 Dübelbaumsystem Londek

Das Deckensystem Londek ist eine Weiterentwicklung der historischen Dübelbaumdecke. Der Entwicklung liegt die Idee der maschinellen Fertigung der einzelnen Träme zu Grunde. Das aus stabförmigen Einzelkomponenten (Abbildung 25) bestehende System kann einzeln verlegt werden, weshalb es unter anderem bei Umbauten in bestehenden Gebäuden wie zum Beispiel bei der Althaussanierungen sehr gerne eingesetzt wird. Massive Balken mit Abmessungen, welche abhängig von der Belastung sind, werden mittels einer Feder formschlüssig verbunden. Die Lagesicherung der Balken erfolgt durch Verschraubung an die darunter liegenden Wände. Zusätzlich werden die Balken untereinander nicht sichtbar verschraubt. Als Schallschutz bei den Deckenaufbauten werden massige Zwischenlagen in der Form von Splittschüttungen, Lehmziegellagen, Betonplatten oder Estrich verwendet.

[3] Longin 2008

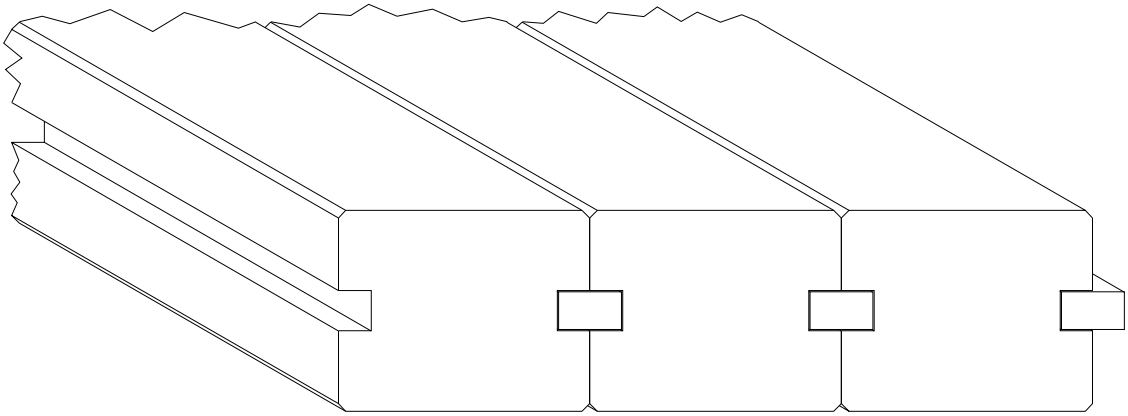

Abbildung 25: Düppelbausystem Londek (e.A.)

4.2.2 Brettstapelsystem Londyb

Die Brettstapelbauweise Londyb (Abbildung 26) kann sowohl als Wand- als auch Deckensystem eingesetzte werden.

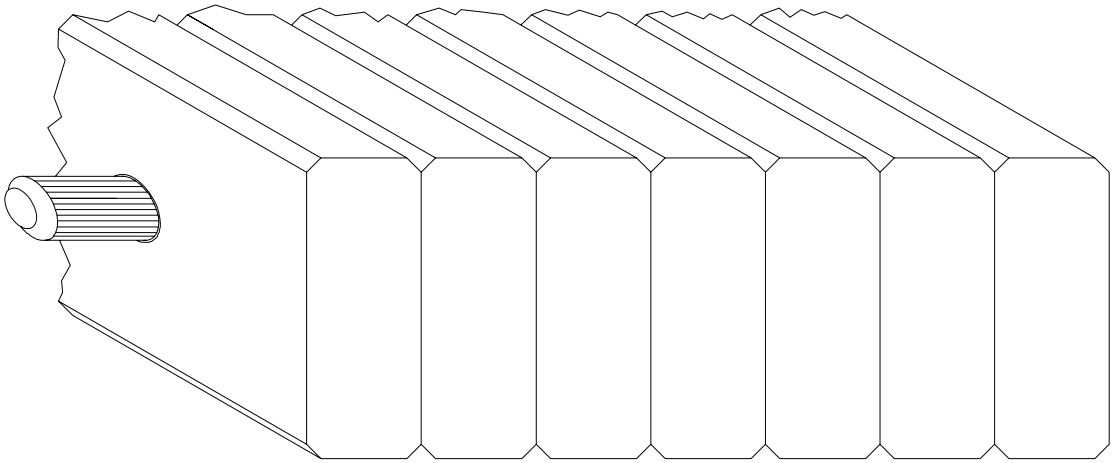

Abbildung 26: Brettstapelsystem Londyb (e.A.)

Die Verbindung eines Standard Brettstapels erfolgt durch getrocknete Buchendübel (Dübeldurchmesser 20 mm, Dübellänge 60 cm), welche alle 30 cm in vorgebohrte Löcher mit einem Durchmesser von 19,5 mm eingepresst werden. Londyb als Wandsystem wird standardmäßig mit einer Lamellengröße von 10,5 cm mal 4,2 cm produziert.

Decken werden mit Dicken von 10,5 cm bis 20,5 cm je nach Belastungsfall produziert. Ab einer Dicke von 14,5 cm werden die Dübel diagonal versetzt eingebracht (Abbildung 27).

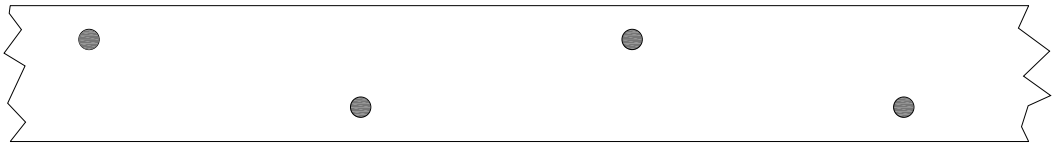

Abbildung 27: Brettstapel (Dicke > 14,5cm) mit diagonal versetzten Dübeln (e.A.).

Die Brettstapelelemente werden mit Längen bis zu 12 m gefertigt. Die Breite der Elemente beträgt bei Decken 2,5 m beim Einsatz als Wandelemente werden die Brettstapelbreite nach Kundenwunsch (die Länge entspricht der Raumhöhe) gefertigt welche in einen Holzrahmen eingesetzt werden. Deckenelemente werden nach dem Verlegen im Stoßbereich kreuzweise verschraubt.

Ein typischer Aufbau einer Wand wird in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Wandaufbau mit Londyb Brettstapelelementen

Position	Dicke [cm]	Bauteilbezeichnung
1	10,5	Brettstapel
2	-	Dampfbremse
3	24	Mineralwolle
4	1,5	Holzweichfaserplatte
5	3	Hinterlüftungsebene
6	2,5	Fassaden-Schalung
Σ	**41,5**	**[cm]**
U-Wert	**0,17**	**[W/m²K]**

Kabelkanäle für Elektroinstallationen werden auf der Baustelle mit Hilfe einer Oberfräse durch das gezielte Herausfräsen einzelner Lamellen erzeugt und anschließend mittels einer Blendlamelle abgedeckt.

4.3 Otmar Berger Zimmerei und Sägewerk[4]

Geramühl 10	02632 / 72278
2763 Pernitz / NÖ	www.holzbauberger.at www.brettstapel.at

Die Firma Berger wurde 1981 als Zimmerei gegründet und verfügt über ein eigenes Sägewerk. Aus der Überlegung heraus, die Seitenware besser nutzen und vermarkten zu können, wurde 1998 begonnen, Brettstapelelemente zu produzieren.

Das eingeschnittene Holz wird aus der Region bezogen, wobei die Hauptbaumarten Fichte, Kiefer und Lärche sind. Im Jahr werden ungefähr 2000 bis 2500 fm eingeschnitten, die für den Eigenbedarf benötigt werden. Im Durchschnitt werden 10 Häuser jährlich produziert, hauptsächlich in Mischbauweise d.h. Brettstapelelemente an Sichtflächen. Die übrigen Wände werden in Holzrahmenbauweise ausgeführt. 20% der produzierten Bauten werden auf Wunsch der Kunden ausschließlich mit Brettstapelelementen ausgeführt.

4.3.1 Brettstapelelemente

In die 4 cm dicken Bretter werden im Abstand von 60 cm Bohrungen mit einem Durchmesser von 19,5 mm gebohrt und auf die 2,5 m langen Buchendübel mit einem Durchmesser von 20 mm aufgesteckt. Um das Auffädeln der Bretter zu ermöglichen, sind die Buchendübel an den ersten 50 cm konisch gefräst. Nach Erstellen eines 2 m breiten Elements werden die 50 cm überstehenden (konisch gefrästen) Dübel gekappt. Es können Elemente bis zu 7 m Länge produziert werden. Je nach Einsatzgebiet können Bretter von 8 cm bis 24 cm Breite verarbeitet werden. Die größeren Brettbreiten kommen vor allem bei der Produktion von Brettstapeldecken zum Einsatz.

Die Brettstapelelemente werden in drei Qualitäten (Industriequalität, Standardqualität und Sichtqualität) angeboten.

Neben den optischen Eigenschaften wie Verfärbung, Astanteil, und Oberflächenqualität werden bei der Industriequalität sägeraue Bretter mit ungefassten Kanten verarbeitet.

Die Standard- und Sichtqualität (Abbildung 28) wird aus gehobelten Brettern produziert, die gefasste Kanten und seitlich eine gehobelte Falzverbindung aufweisen.

[4] Berger 2008

Bei der Sichtqualität wird sortenreines Fichtenholz verwendet.

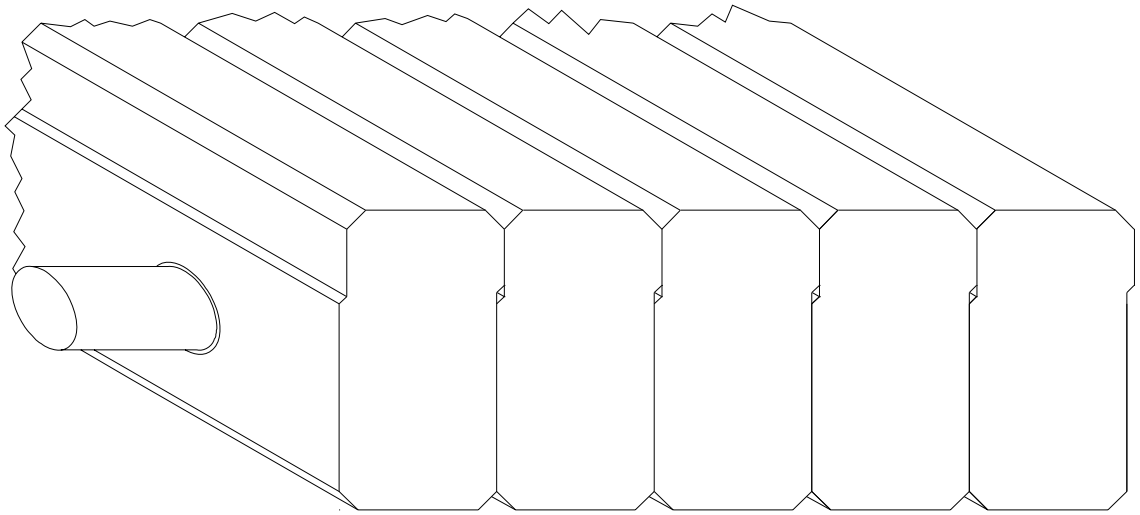

Abbildung 28: Brettstapelsystem der Firma Holzbau Berger (e.A.).

Für Wände werden die Brettstapelelemente üblicherweise mit einer Dicke von 10 cm produziert. Ein typischer Wandaufbau ist in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Wandaufbau mit Brettstapelsystem der Firma Holzbau Berger

Position	Dicke [cm]	Bauteilbezeichnung
1	10	Brettstapel
2	-	Dampfbremse
3	2,4	Diagonalbrettschalung
4	20	Mineralwolle
5	6	Holzweichfaserplatte
6	3	Hinterlüftungsebene
7	2	Fassaden-Schalung
Σ	**43,4**	**[cm]**
U-Wert	**0,16**	**[W/m²K]**

4.4 Sohm Holzbautechnik GesmbH[5]

Bühel 818 05579 / 7115-0

6861 Alberschwende / V www.sohm-holzbau.at

Die Firma Sohm wurde 1991 gegründet und produziert seit 2001 Brettstapelholz, das unter dem Namen Diagonal Dübelholz vermarktet wird.

Die Buchendübel werden nicht wie bei den anderen Herstellern im rechten Winkel zu den Brettern sondern abwechselnd in einem Winkel von 75° und 105° diagonal in den vorgebohrten Brettstapel eingepresst.

Das Schnittholz wird von externen Sägewerken bezogen. Im Jahr werden ca. 8000 m³ der Holzarten Fichte (70%) und Tanne (30%) verarbeitet.

Durchschnittlich werden im Jahr 30 Häuser gebaut. Der Mitarbeiterstand beträgt 50 Personen. Standardmäßig sind die Außenwände und Decken mit Diagonal Dübelholz Elementen ausgestattet.

4.4.1 Diagonal Dübelholz Brettstapelelemente

Die Buchenholzdübel mit 20 mm Durchmesser werden in Bohrungen mit 19,5 mm Durchmesser eingepresst. Der Dübelwinkel beträgt abwechselnd 75° und 105° zu den Lamellen des Brettstapels. Damit ergibt sich eine V-förmige Anordnung der Dübel quer zum Element (Abbildung 29). Wird das Brettstapelelement als Deckensystem eingesetzt, kann es je nach Belastung erforderlich sein, den Dübelabstand zu verkleinern. Ist der minimale Dübelabstand erreicht, spricht man von der W-förmigen Anordnung der Dübel.

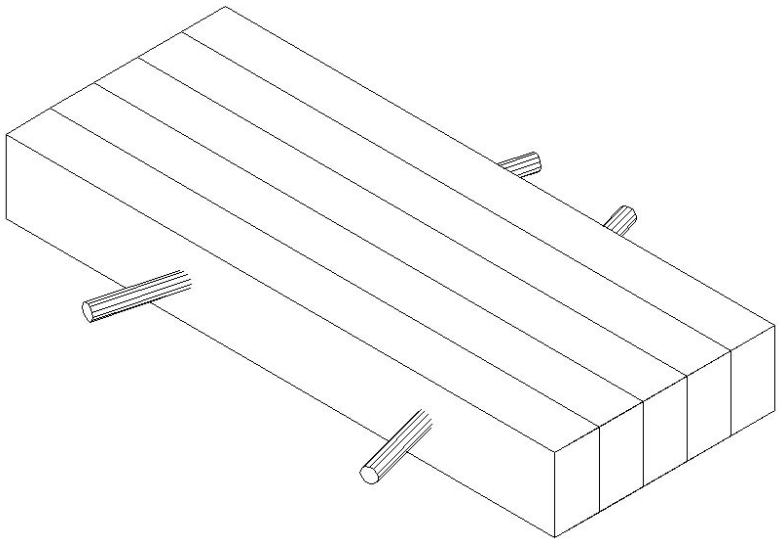

Abbildung 29: Diagonal Dübelholz Brettstapelelement (e.A.)

[5] Kempf 2008

Diagonal Dübelholz Elemente werden mit einer Elementenbreite von 60 cm gefertigt. Werden Elemente mit einer Länge größer als 5 m hergestellt, wird im Werk das zugekaufte Vollholz zu KVH keilgezinkt.

4.4.2 Wandaufbau

Es werden standardmäßig zwei verschiedene Wandaufbauten angeboten: Diagonal-Dübel-Bloc und Diagonal-Dübel-Bloc-Iso.

Die Variante Diagonal-Dübel-Bloc (Tabelle 5) ist ein mehrschaliges Massivholzsystem getrennt durch eine Holzwerkstoffplatte, welche als Dampfbremse wirkt. An der Außenseite wird vollflächig eine Holzfaserdämmplatte angebracht.

Tabelle 5: Wandaufbau Diagonal-Dübel-Bloc

Position	Dicke [cm]	Bauteilbezeichnung
1	8	DiagonalDübelholz
2	2	Holzwerkstoffplatte
3	24	DiagonalDübelholz
4	2	Holzweichfaserplatte
5	4	Hinterlüftungsebene
6	3	Fassaden-Schalung
Σ	**43**	**cm**
U-Wert	**0,24**	**W/m²K**

Bei dem Wandaufbau in der Variante Diagonal-Dübel-Bloc-Iso (Tabelle 6) ist das Brettstapelelement in der Wand durch eine Holzfaserdämmung ersetzt, wodurch ein niederer U-Wert erreicht wird.

Tabelle 6: Wandaufbau Diagonal-Dübel-Bloc-Iso

Position	Dicke [cm]	Bauteilbezeichnung
1	8	DiagonalDübelholz
2	2	Holzwerkstoffplatte
3	18	Holzfaserdämmung
4	2	Holzweichfaserplatte
5	4	Hinterlüftungsebene
6	2,5	Fassaden-Schalung
Σ	**36,5**	**cm**
U-Wert	**0,19**	**W/m²K**

4.4.3 Deckenaufbau

Die einzelnen Lamellen werden entweder stumpf (Abbildung 30) oder profiliert (Abbildung 31) gestoßen. Die Elementenstoßausbildung erfolgt immer mit Kamm und Nut gespundet.

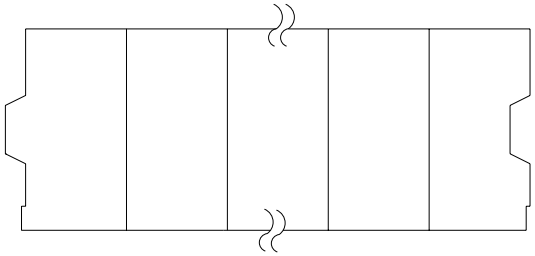

Abbildung 30: Oberflächenprofil Glattkant (mit stumpf gestoßenen Lamellen) (e.A.).

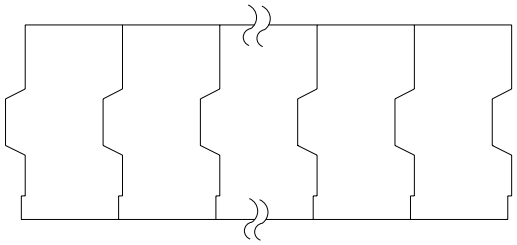

Abbildung 31: Oberflächenprofil Glattkant (mit profiliert gestoßenen Lamellen) (e.A.).

Von den Oberflächenprofilen gibt es die Auswahl zwischen Glattkant (Abbildung 30 und Abbildung 31), Schattennut (Abbildung 32), Akustikprofil (Abbildung 33), Sägeroh-Stumpf-Profil (Abbildung 34) und Lehmputz-Struktur-Profil (Abbildung 35).

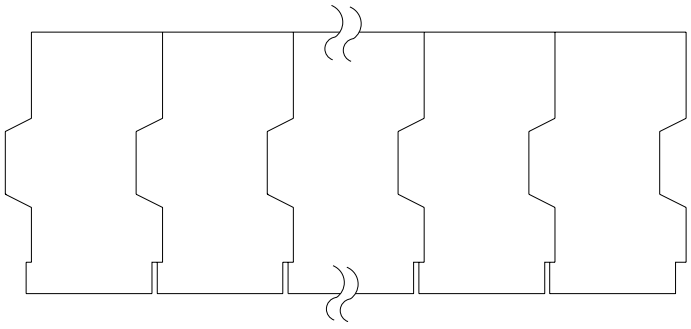

Abbildung 32: Oberflächenprofil Schattennut (mit profiliert gestoßenen Lamellen) (e.A.).

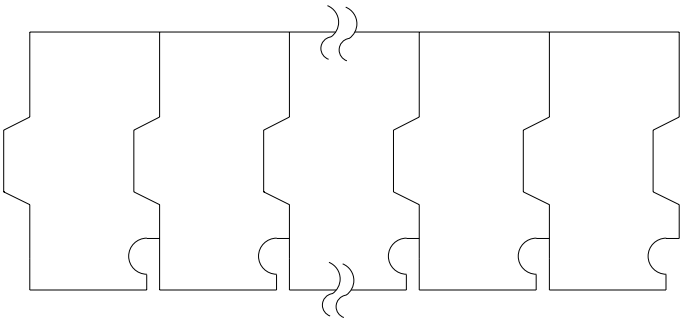

Abbildung 33: Oberflächenprofil Akustikprofil (mit profiliert gestoßenen Lamellen) (e.A.).

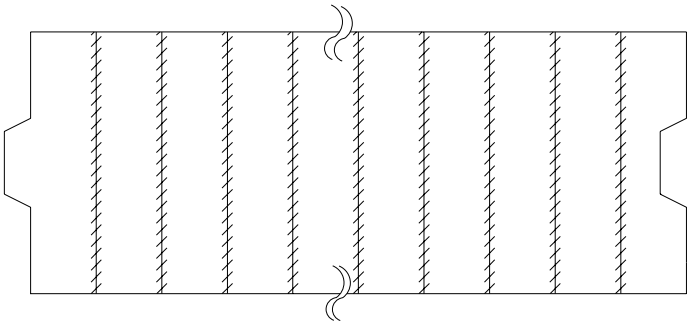

Abbildung 34: Oberflächenprofil Sägeroh-Stumpf-Profil (mit profiliert gestoßenen Lamellen) (e.A.).

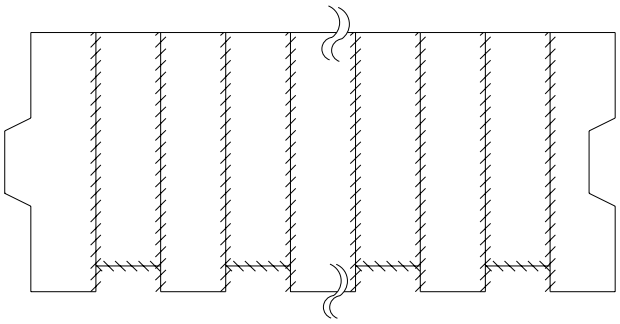

Abbildung 35: Oberflächenprofil Lehmputz-Strukur-Profil (mit profiliert gestoßenen Lamellen) (e.A.).

Es werden drei Qualitäten angeboten: Auslese, Sichtqualität und nicht Sichtqualität. Die Qualitäten unterscheiden sich primär nach der Astigkeit, der Lage der Jahrringe, Verfärbungen und anderen optischen Eigenschaften.

4.5 Kasper Greber Holz-Wohnbau GmbH[6]

Ellenbogen 632 05514 / 2360

6870 Bezau / V www.kaspargreber.at

Das Unternehmen Kasper Greber Holz-Wohnbau GmbH wurde 2000 gegründet und produziert seit 2004 Brettstapelholz, das unter dem Markennamen Nadelstreifholz und Nadelstreifholz plus vermarktet wird. Bei der Brettstapelvariante Nadelstreifholz plus wird auf die Sichtoberfläche eine 5 mm dicke Furnier aufgeleimt. Das Ziel war, Sichtmassivholzflächen mit hoher Oberflächenqualität zu erzeugen.

Jährlich werden von den 20 Mitarbeitern ca. 5000 bis 6000 m² Massivholzelemente produziert. Für die Lamellen wird zugekauftes KVH der Holzarten Fichte, Tanne und Lärche verwendet.

Nadelstreifholz ist sowohl als Decken- als auch als Wandelement einsetzbar. Zurzeit werden ungefähr 25 Häuser im Jahr mit Deckenelementen ausgerüstet, wobei 5 Häuser zusätzlich noch Brettstapel Wandelemente bekommen.

4.5.1 Nadelstreifholz Brettstapelelemente

Die einzelnen Lamellen werden mit Kamm, Nut und Entlastungsschlitzen versehen (Abbildung 36). Die Lamellen werden zu Brettstapeln mit einer Breite von 90 cm zusammengefügt. In ein Loch mit 19,5 mm Durchmesser wird ein Buchdübel mit 20 mm eingepresst. Die Dübellänge beträgt 89,5 cm; der Dübelabstand beträgt bei Wandelementen in der Regel 60 cm, bei Deckenelementen meist 14 cm.

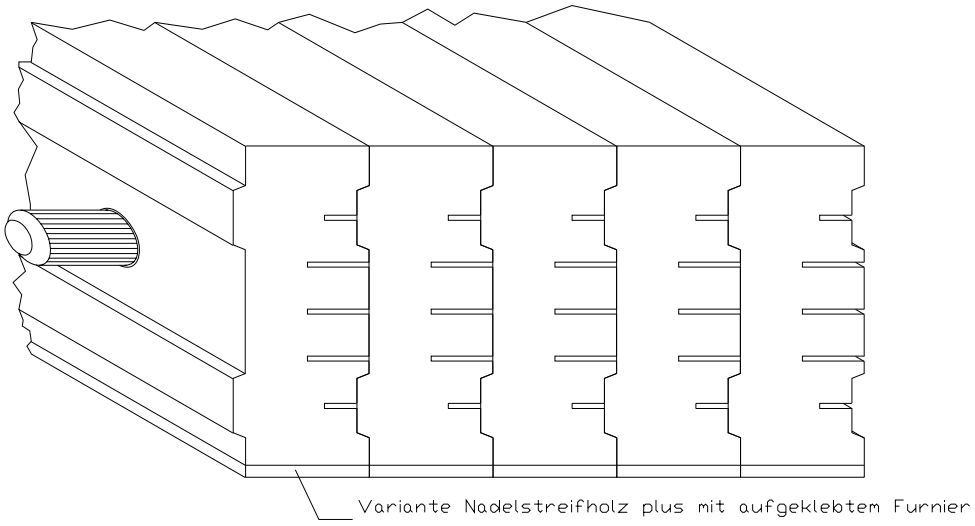

Abbildung 36: Brettstapelsystem Nadelstreifholz plus (e.A.).

[6] Greber 2008

4.5.2 Wandaufbau

Es gibt standardmäßig zwei verschiedene Wandaufbauten: Die erste Variante besteht nur aus Nadelstreifholz ohne Dämmung (Tabelle 7). In der zweiten Variante (Tabelle 8) wird das Nadelstreifholz in der Wand durch eine 20 cm dicke Dämmung ersetzt.

Tabelle 7: Wandaufbau mit dem Brettstapelsystem Nadelstreifholz

Position	Dicke [cm]	Bauteilbezeichnung
1	9,5	Nadelstreifholz plus
2	1,9	Dreischichtplatte
3	20	Nadelstreifholz
4	-	Polyacryl Fassadenbahn
5	2,7	Hinterlüftungsebene
6	2	Fassaden-Schalung
Σ	**36,1**	**cm**
U-Wert	**0,35**	**W/m²K**

Tabelle 8: Wandaufbau mit dem Brettstapelsystem Nadelstreifholz und Dämmung

Position	Dicke [cm]	Bauteilbezeichnung
1	9,5	Nadelstreifholz plus
2	1,9	Dreischichtplatte
3	20	Mineralwolle
4	-	Polyacryl Fassadenbahn
5	2,7	Hinterlüftungsebene
6	2	Fassaden-Schalung
Σ	**36,1**	**cm**
U-Wert	**0,17**	**W/m²K**

4.5.3 Deckenaufbau

Nadelstreifholz wird wie das Diagonal Dübelholz der Sohm Holzbautechnik GesmbH in den Ausführungen Universal (entspricht Glattkant Abbildung 30), Schattennut (Abbildung 32), Akustik (Abbildung 33), und Struktur (Abbildung 35) produziert. Die Ausführungen der beiden Unternehmen unterscheiden sich zwar in Details, auf die aber in dem Dokument nicht näher eingegangen wird.

Zusätzlich zu den oben genannten Ausführungen bietet Kaspar Greber noch die Varianten Leitung (Abbildung 37), Fase (Abbildung 38) und Rundung (Abbildung 39) an.

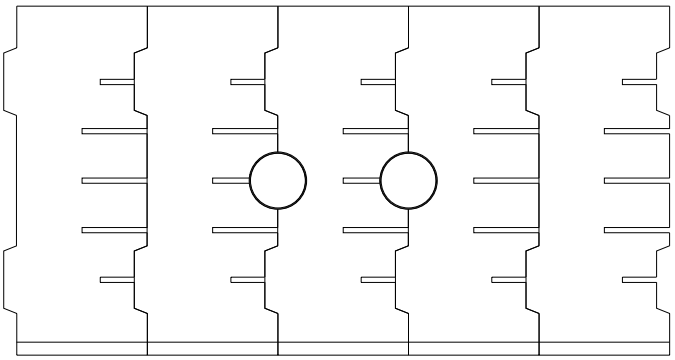

Abbildung 37: Nadelstreifholz plus mit eingesetzter Elektroinstallationsleitung (e.A.).

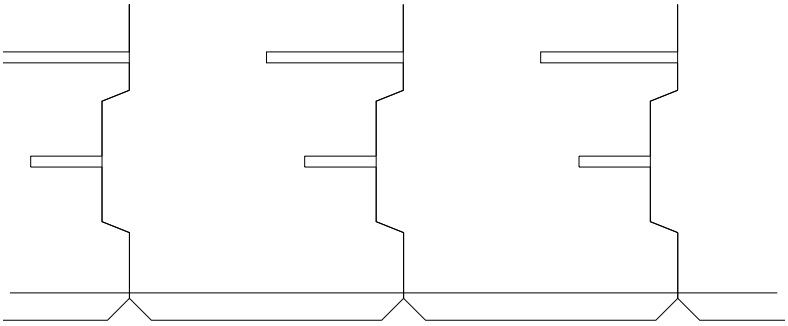

Abbildung 38: Nadelstreifholz plus in der Oberflächenausführung Fase (e.A.).

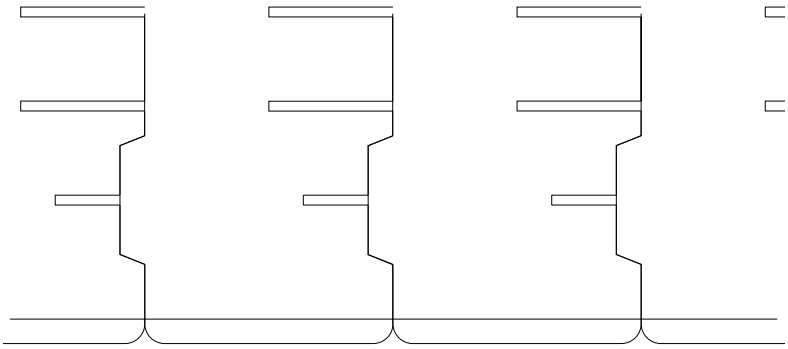

Abbildung 39: Nadelstreifholz plus in der Oberflächenausführung Rundung (e.A.).

In der Ausführung Nadelstreifholz (ohne aufgeklebtes Furnier) gibt es die Möglichkeiten zwischen den Qualitäten astfrei, mit Ästen und nicht sichtbar zu wählen.

Nadelstreifholz plus wird auf der Sichtseite standardmäßig mit einem 5 mm Dicken Furnier versehen. Als Holzarten werden Fichte, Tanne, Lärche, Eiche und Zirbe angeboten.

4.6 Walch GmbH[7]

Zementwerkstraße 42	05550 / 20290-0
6713 Ludesch / V	www.oekohaus.at

Die Walch GmbH wurde 1998 gegründet und gliedert sich in zwei Geschäftsbereiche, die sich zum einen mit der Planung und Errichtung von Holzgebäuden und zum anderen mit der Produktion von Fenstern und Fassaden beschäftigen.

Im Jahr werden ca. 15 Häuser produziert. Diese basieren je nach Kundenwunsch auf gedübelten Brettstapel- oder geleimten Brettsperrholzelementen.

2003 wurde mit der Brettstapelproduktion begonnen und unter dem Namen „massive Naturholzwand“ vermarktet. Bis jetzt wurden in 5 Häusern sowohl die Wände als auch die Decken mit den gedübelten Brettstapeln ausgeführt. Bei weiteren 20 Häusern wurden nur die Decken mit Brettstapeln ausgestattet.

Nach mehrjähriger Entwicklung brachte Christan Walch 2008 ein direkt verklebtes Holz-Glas Fenstersystem auf den Markt. Der Holzrahmen wird außen vollflächig von einer Glasscheibe abgedeckt, wodurch zum einen der Holzrahmen vor Witterungseinflüssen geschützt ist und zum anderen ein speziell entwickelter Wendebeschlag ein problemloses Pflegen der außen liegenden Scheibe ermöglicht. Außerdem kann der Öffnungsflügel so in die Wand integriert werden, dass der Eindruck eines rahmenlosen Fensters entsteht.

Derzeit beschäftigt die Walch GmbH 20 Mitarbeiter, welche in den beiden Geschäftsbereichen tätig sind.

2001 wurde eine Produktionshalle gebaut, die 18 entkernte Baumstämme als Säulen verwendet. Die 8 m langen und Stämme aus Fichte oder Tanne, die einem Zopfdurchmesser von 40 cm haben, wurden entkernt (Kernbohrung mit 12 cm Durchmesser), womit es möglich war, die Stämme rissfrei zu trockenen. Technisch möglich wäre es, Stämme bis zu einer Länge von 12 m zu entkernen. Bis jetzt wurden noch keine Säulen dieser Art verkauft.

[7] Lorünser 2008; Kapfinger 2002

4.6.1 Brettstapel

Das Brettstapelsystem besteht aus einzelnen Lamellen, die eine starke Verzahnung aufweisen (Abbildung 40).

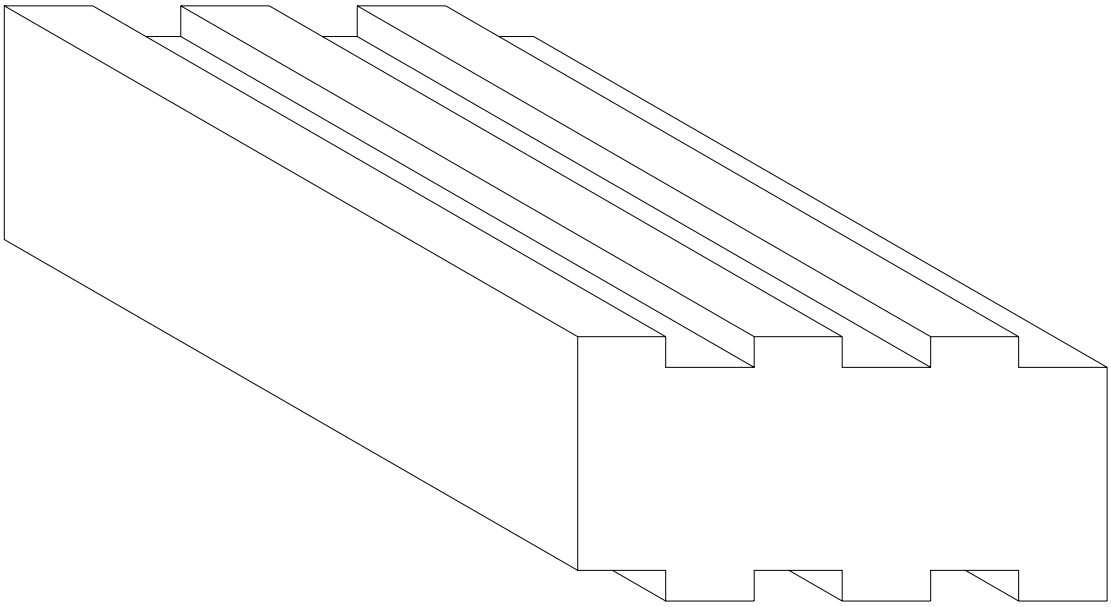

Abbildung 40: Lamelle des Brettstapelsystems „massiven Naturholzwand“ (e.A.).

4.6.2 Wandaufbau

Im Gegensatz zu allen anderen in diesem Dokument beschrieben Brettstapelsystemen werden bei der „massiven Naturholzwand“ von Christian Walch nicht vertikale, sondern horizontale, Lamellen verwendet. Das damit auftretende Problem der Setzungen wird umgangen, indem die einzelnen Lamellen beim Zusammensetzen auf Distanz gehalten werden. Damit kann jede Lamelle für sich quellen und schwinden. Durch die mehrfache Verzahnung der Lamellen untereinander ist die Winddichtheit gewährleistet. Die vertikale Lastabtragung erfolgt rein über die vertikal angeordneten Dübel (Abbildung 41). Diese haben je nach statischer Belastung einen Durchmesser von 20 mm bis 40 mm und laufen über die gesamte Geschosshöhe durch. Die Dübel sind aus Eichen- oder Buchenholz gefertigt und werden in vorgebohrte Löcher eingepresst, die einen um 0,5 mm kleineren Durchmesser besitzen als der Dübel selbst.

Produziert wurden Wände in den Varianten 12 cm „massive Naturholzwand“ mit Dämmung (Tabelle 9) bzw. 24 cm „massive Naturholzwand“ ohne Dämmung.

Tabelle 9: Typischer Wandaufbau „massive Naturholzwand“

Position	Dicke [cm]	Bauteilbezeichnung
1	12	Brettstapel „massive Naturholzwand“
2	16	Holzweichfaserplatte
3	-	Windpapier
4	4	Hinterlüftungsebene
5	2	Fassaden-Schalung
Σ	**34**	**cm**
U-Wert	**0,19**	**W/m²K**

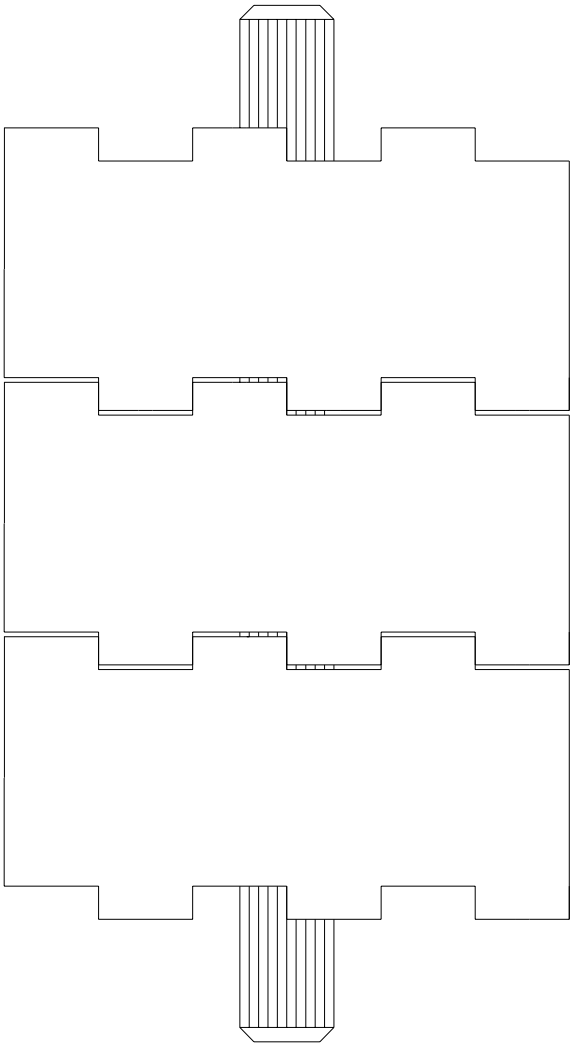

Abbildung 41: Brettstapelsystem „massive Naturholzwand“ mit einer Dicke von 12 cm, verdübelt mit einem 2 cm Hartholzdübel welcher die vertikalen Kräfte abträgt (e.A.).

4.6.3 Deckenaufbau

Wie bei allen Brettstapelelementen ist es auch hier möglich, diese als Deckenelemente einzusetzen.

4.7 oa.sys baut gmbh[8]

Zoll 887 05579 / 20257-0

6861 Alberschwende / V www.oa-sys.com

Die Firma oa.sys baut gmbh wurde 2004 gegründet, sie hat sich aus dem Unternehmen Berlinger Holzbau entwickelt. Die Abkürzung oa.sys steht für „offenes Architektursystem“, was andeuten soll, dass trotz Systembauweise Individualität mittels eines Modulkonzeptes erreicht werden kann. Die Produktion der genagelten Brettstapeldecken begann Mitte der 1980er Jahre - zunächst noch händisch, ab 1995 wurden genagelte Brettstapeldecken maschinell produziert. Die Produktion der Brettstapelelemente führte zu einer besseren Verwertung der Seitenware. Im Jahr werden ca. 15 000 m² bzw. 1 200 m³ Fichten- und Tannenholz für die Erzeugung der Brettstapelelemente verwendet. Das Unternehmen produziert mit ihren 25 Mitarbeitern im Jahr 35 Häuser. Die Brettstapel werden ausschließlich als Deckenelemente eingesetzt; die Wände werden im Rahmenbau errichtet. Ca. fünf Prozent des Umsatzes werden pro Jahr mit den Brettstapeldecken erwirtschaftet.

4.7.1 Genagelte Brettstapeldecken

Die Lamellenstärke beträgt standardmäßig 46 mm, die Lamellenlänge 5 m. Werden längere Brettstapelelemente gefertigt, werden die Lamellen stumpf gestoßen. In diesem Fall wird in den Elementen mit wandernden Lamellenstößen gearbeitet, d.h. zwei benachbarte Stöße werden mindestens um 80 cm versetzt. Die Breite der Brettstapelelemente beträgt in der Regel 120 cm. Die Lamellenhöhen von 80 bis 260 mm sind je nach Belastung zu wählen.

Die Bretter sind untereinander vernagelt, wobei sich das Nagelmuster sich bei jedem zweiten Brett wiederholt (Abbildung 42). Aussparungen und Durchbrüche müssen bei der Herstellung bekannt sein, damit die Nagelung entsprechend gesteuert werden kann, um eine spätere problemlose Nachbearbeitung zu gewährleisten.

Die Verbindung von Element zu Element erfolgt mittels Nagelung, Schrägschraubung, Lochblechen oder Plattenstreifen.

[8] Baldauf 2008

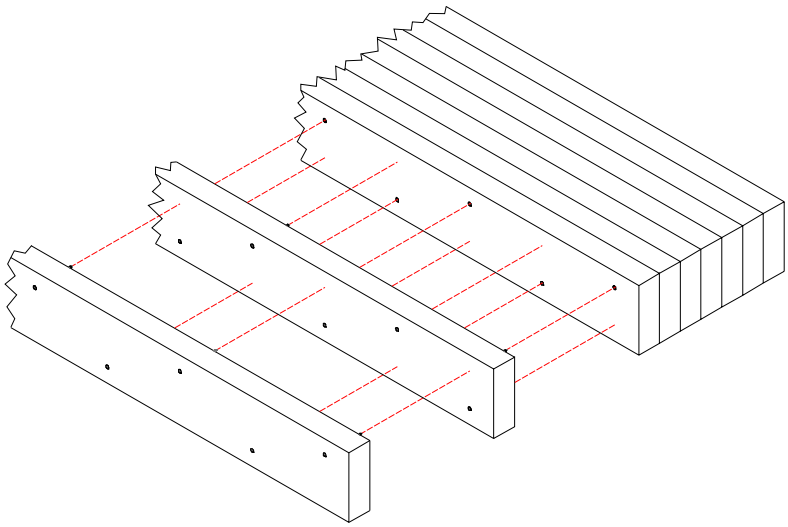

Abbildung 42: Brettstapelsystem mit Nagelschema (e.A.).

Die Lamellen werden in den Qualitäten Normal- und Sichtqualität produziert. Die Normalqualität gibt es in den Varianten sägerau (Lamellendicke 46 mm, Lamellenbreite 80 mm bis 260 mm) und gehobelt (Lamellendicke 43 mm, Lamellenbreite 75 mm bis 250 mm).

Die Sichtqualität wird gehobelt und mit einer 0,5 bis 1 mm tiefen Ausnehmung produziert, was ein Schließen der Längsfuge gewährleistet (Abbildung 43).

Die Kanten können scharfkantig, gefast, als Schattennut oder als Akustikprofil ausgeführt werden.

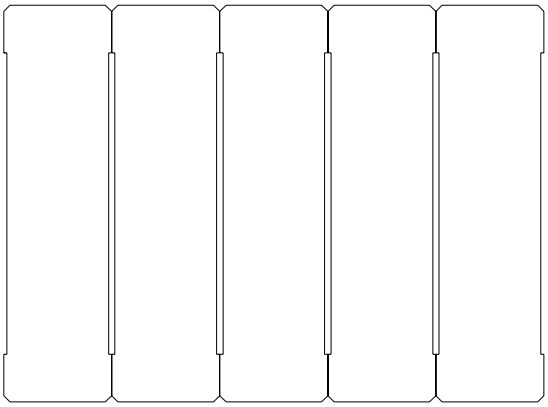

Abbildung 43: Sichtqualität mit Ausnehmung und gefasster Kante (e.A.).

An der Baustelle wird zuerst die Brettstapeldecke mit OSB-Platten bedeckt, darüber eine Dämmung und der Estrich verlegt. Wird die Unterseite nicht als Sichtfläche ausgebildet, werden abgehängte Deckenelemente verwendet.

4.8 Ing. Erwin Thoma Holz GmbH[9]

Hasling 35 06415 / 8910

5622 Goldegg / S www.thoma.at

Das Unternehmen Ing. Erwin Thoma Holz GmbH wurde 1990 gegründet. 1998 wurde das Produkt Holz100 zum Patent angemeldet. Bei Holz100 handelt es sich um ein verdübeltes Brettsperrholz, welches als Wand-, Decken- und Dachelement eingesetzt werden kann.

Holz100 wurde entwickelt, um hochwertige Massivholzbausysteme industriell zu fertigen und dabei die Nachteile des klassischen Blockbaus, wie geringe Ausbeute beim Einschnitt, Setzungen, mangelnde Winddichtheit und eine mäßige Wärmedämmung zu verhindern.

Das Unternehmen Thoma besitzt mehrere Holz100-Produktionsstätten in Europa und fertigt mit seinen 120 Mitarbeitern durchschnittlich 150 Häuser im Jahr. Für die Produktion der Häuser werden 9000 m³ Holz von Fichte, Tanne, Lärche, Kiefer in allen Qualitäten verarbeitet.

Die höchsten realisierten Gebäude betragen, wie durch die gültige ÖNORM vorgegeben, vier Stockwerke. Laut Angaben der Firma Thoma könnten mit der Holz100 Technologie auch zehn Stockwerke in reiner Holzbauweise realisiert werden.

Das Unternehmen wirbt damit, das Holz nur „zum richtigen Zeitpunkt“, in der Winterruhe bei abnehmendem Mond zu ernten.

Holz100 wird derzeit auch von einem Betrieb in Norwegen in Lizenz gefertigt.

4.8.1 Holz100 Brettsperrholz

Die verdübelten Holz100 Brettsperrholzelemente werden in den unterschiedlichsten Varianten gebaut. Alle Ausführungsvarianten der Wände haben eine stehende Lage von 6 cm bzw. 8 cm dicken Pfosten in der Wandmitte gemeinsam. Auf die Mittellage werden je nach Elementstärke Lagen aus 2,9 cm dicken Brettern, welche abwechselnd horizontal, diagonal und vertikal verlegt werden, aufgebracht. Je nach Anwendungsgebiet (Wand-, Decken- und Dachplatten Elemente) ist der Dübelraster unterschiedlich. Bei Wänden liegt der Abstand in der Regel bei 40 cm; bei Decken in Spannrichtung bei 28 cm, quer zur Spannrichtung bei ca. 20 cm.

[9] Rieser 2008, Thoma 2003

Die Buchendübel haben einen Durchmesser von 21,5 mm. Die vorgebohrten Löcher haben in der Regel einen um 2 mm kleineren Durchmesser als die Dübel. An der Innenseite der Wände wird eine Lage Papier eingelegt.

Die Wände können mit unterschiedlichsten Beplankungen versehen werden. Im Trockenbau werden plattenförmige Werkstoffe wie Gipskarton-, Gipsfaserplatten für Verfliesungen als Untergrund eingesetzt. Lehmbauplatten mit und ohne Wandheizungen und ähnlich Systeme sind ebenso möglich. Als Untergrund für mineralische Putze werden Holzweichfaserplatten verwendet bei Lehmputzen Schilfmatten.

4.8.2 Wandelemente

Bei den Wandelementen gibt es zwei verschiedene Ausführungsvarianten, Holz100 und Holz100Thermo. Der Standard Holz100 Aufbau besteht aus sägerauen Brettern. Bei Holz100Thermo werden die Bretter gehobelt und mit 3 cm breiten und 2 mm tiefen Nuten versehen (Abbildung 44). Durch die damit entstehenden Lufträume, welche als Isolierschichten wirken, wird der Wärmedurchgangswert verkleinert.

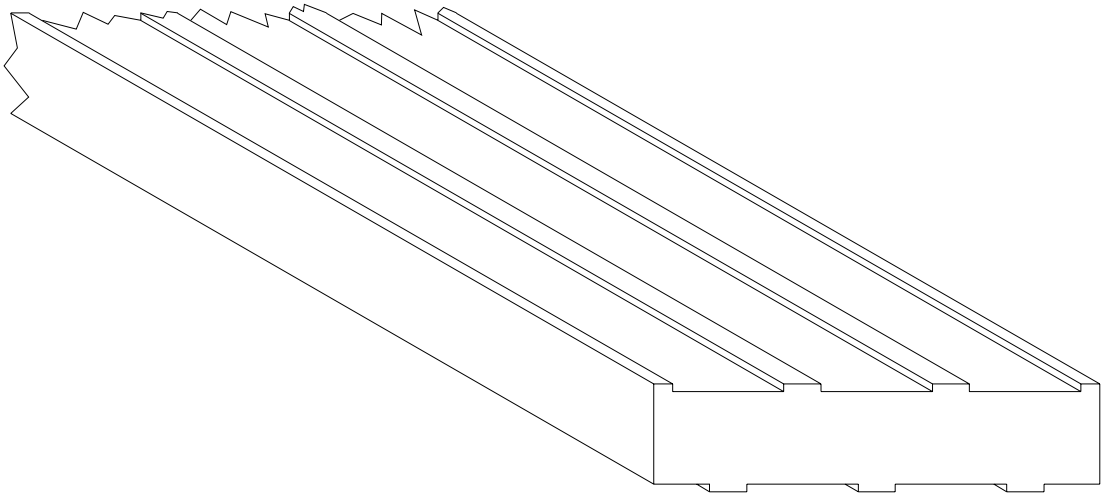

Abbildung 44: Brett einer Holz100 Thermo Wand (e.A.).

Tragende Wände werden in den Varianten Holz100 von 12 cm bis 36,4 cm (in diesem Dokument wird nur auf Wandaufbauten mit einer Dicke ab 17 cm eingegangen wird, siehe Typ A bis E, Tabelle 10, Abbildung 45) und Holz100Thermo mit einer Stärke von 30,6 cm oder 36,4 cm (Typ D, Typ E, Tabelle 10, Abbildung 45) standardmäßig angeboten. Die hier angegeben Werte beziehen sich nur auf die Brettsperrholzelemente. Werden auf der Außenseite Holzweichfaserplatten angebracht, sind diese zu den Wandstärken noch zu addieren.

Zur Verdeutlichung des Wandaufbaus wurde die Holz100 Wand mit 25 cm Dicke (Typ C aus Tabelle 10) gewählt und in Tabelle 11 dargestellt. Alle anderen Wanddicken bestehen vom Aufbau her aus den gleichen Baustoffen, wobei sich nur die einzelnen Baustoffschichtdicken ändern.

Tabelle 10: Übersicht über die angebotenen Brettsperrholzsystem

	Typ	Brettsperrholz [cm]	Dämmung [cm]	Σ [cm]	U-Wert [W/m²K]
Holz100	A	17	10	27	0,25
	B	20	10	30	0,23
	C	25	10	35	0,2
	D	30,6	3,5	34,1	0,25
	E	36,4	2,5	38,9	0,24
Holz100Thermo	D	30,6	3,5	34,1	0,21
	E	36,4	2,5	38,9	0,19

Tabelle 11: Wandaufbau Holz100 Wand Typ C

Position	Dicke [cm]	Bauteilbezeichnung
1	5,5	Holz100
2	-	Papier
3	19,5	Holz100
4	10	Holzweichfaserplatte
5	3	Hinterlüftungsebene
6	2	Fassaden-Schalung
Σ	**40**	**[cm]**
U-Wert	**0,2**	**[W/m²K]**

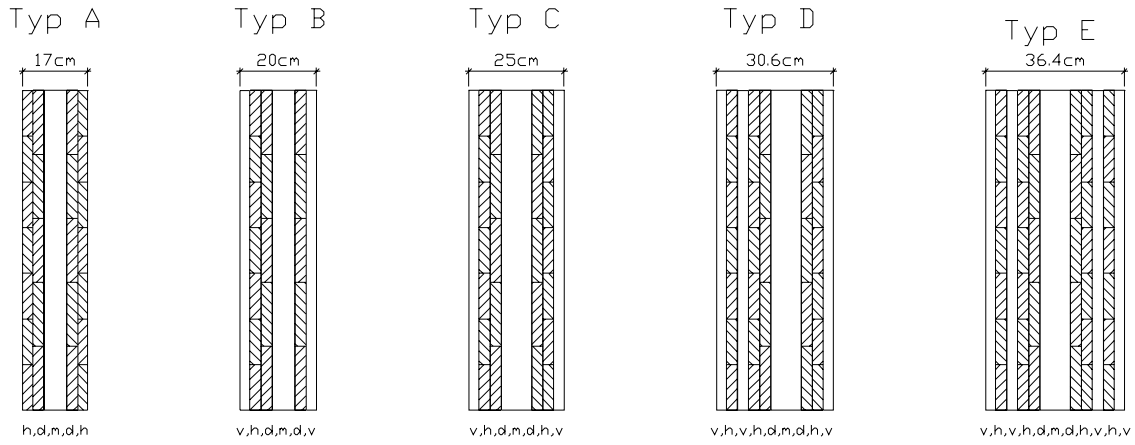

Abbildung 45: Holz100 (A, B, C, D, E) und Holz100 Thermo (D, E) Wandsysteme (ohne Dämmung).
Legende: v = vertikale Brettschicht, h = horizontale Brettschicht, d = diagonale Brettschicht, m = Mittellage (vertikal) (e.A.).

4.8.3 Deckenelemente

Deckenelemente werden in mit Stärken von 17,6 cm (Typ DE 1, Abbildung 46) und 21,2 cm (Typ DE 2, Abbildung 46) angeboten. Der Dübelraster ist abhängig von der Querkraftverteilung.

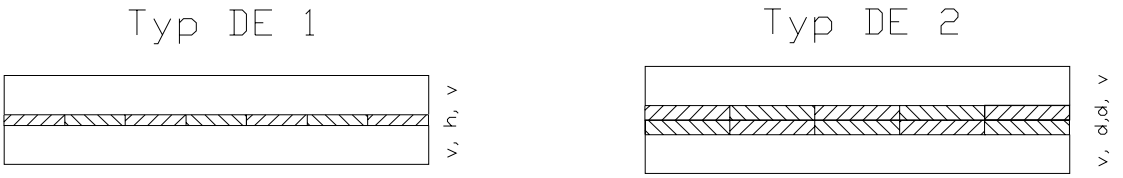

Abbildung 46: Holz100 Deckenelemente.
Legende: v = vertikale Brettschicht, h = horizontale Brettschicht, d = diagonale Brettschicht (e.A.).

4.8.4 Dachelemente

Bei den Dachelementen gibt es drei verschiedene Ausführungen, mit 17 cm (Typ DA 1, Abbildung 47), 19 cm (Typ DA 2, Abbildung 47) und 21,2 cm (Typ DA 3, Abbildung 47) Dicke je nach Dachneigung, Spannweite und Belastungen. Der Dübelraster ist wie bei den Deckenelementen abhängig von der Querkraftverteilung.

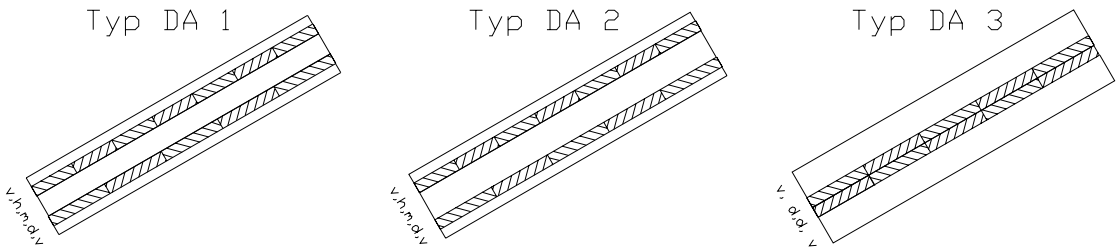

Abbildung 47: Holz100 Dachelemente.
Legende: v = vertikale Brettschicht, h = horizontale Brettschicht, d = diagonale Brettschicht, m = Mittellage (e.A.).

4.9 Holzhäuser Esterbauer[10]

Diepoldsdorf 35 06278 / 7486
5121 Ostermiething / OÖ www.holz-haus.co.at

Holzhäuser Esterbauer wurde im Jahr 2000 gegründet und produziert seit 2006 ein kastenförmiges Wand- und Deckenelement, das von Karl Heinz Esterbauer entwickelt und patentiert wurde. Vermarktet wird das Produkt unter dem Namen Wood-Mega-Therm. Karl Heinz Esterbauer wollte Massivholzdecken mit gutem Schallschutz entwickeln und dabei eine möglichst hohe Wertschöpfung im eigenen Unternehmen schaffen. Die 11 Mitarbeiter der Firma Esterbauer bauen im Jahr insgesamt 20 bis 25 Häuser - die meisten davon im reinen Holzrahmenbau bzw. Holzrahmenbau mit Wood–Mega-Therm Decken. Im Jahr werden 3 Häuser komplett aus Wood-Mega-Therm Elementen (Wand und Decken) gebaut.

Esterbauer kauft nur Rundholz welches mit dem Forest Stewardship Council (FSC) Zertifikat gekennzeichnet ist ein. Ein regionales Sägewerk schneidet, hobelt, profiliert und keilzinkt die Wood-Mega-Therm Pfosten. Der Umsatz mit Wood-Mega-Therm beträgt aktuell 15 % vom Gesamtjahresumsatz. Im Jahr werden ca. 150 bis 200 m³ Holz (Fichte und Tanne) für Wood-Mega-Therm Elemente verarbeitet.

4.9.1 Kastenförmige Elemente Wood-Mega-Therm

Das Grundkonzept von Wood-Mega-Therm besteht in 6 cm dicken Pfosten, die am Rand profiliert werden, um dort in einem Winkel von 90° den Nachbarpfosten einzulegen. Damit entsteht eine V-förmige Struktur, die sich über die Elementenbreite fortsetzen lässt (Abbildung 48). Die Kanten, an denen die Pfosten zusammenstoßen, werden verschraubt. Je nach Einsatz als Decken oder Wandelement werden die dreieckigen Hohlräume mit Dämmstoffen bzw. einer Schüttung versehen. Beplankt werden die Elemente mit sägerauen Nut-Feder Brettern.

Wood-Mega-Therm kann sowohl als Wand- als auch als Deckenelement eingesetzt werden.

[10] Esterbauer 2008

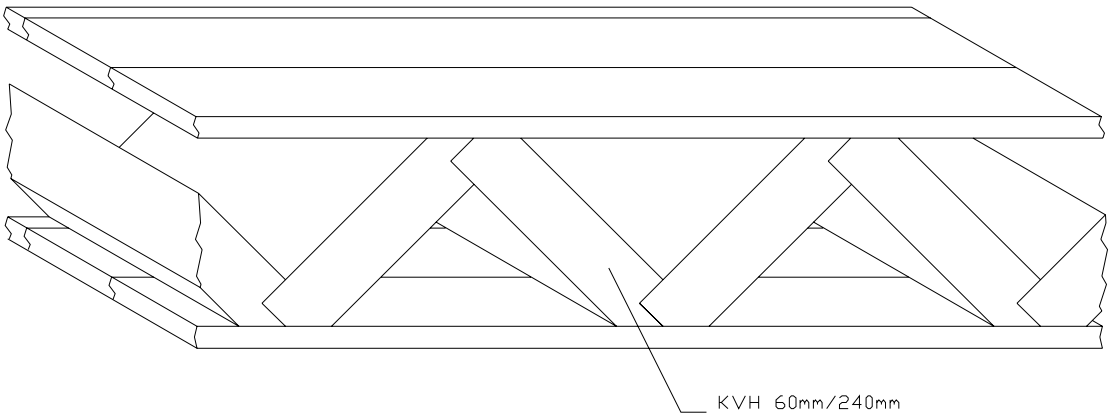

Abbildung 48: Wood-Mega-Therm Element (e.A.).

4.9.2 Wandaufbau

Beim Einsatz der Wood-Mega-Therm Elemente als Wand werden die Hohlräume mit Holzweichfaser Dämmkeilen ausgefacht (Abbildung 49).

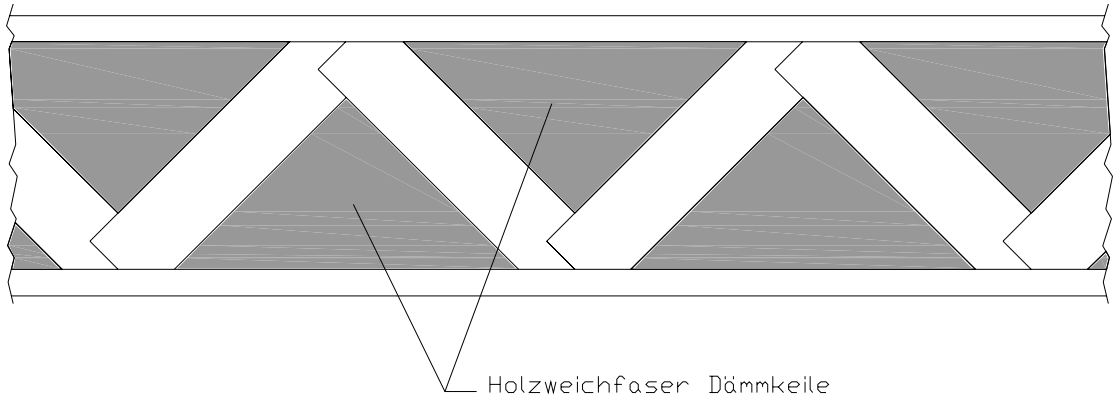

Abbildung 49: Wandaufbau Wood-Mega-Therm (e.A.).

Wie in Tabelle 12 zu sehen ist, werden die Wände auf der Innenseite standardmäßig mit einer Lehmbauplatte versehen. Auf der Außenseite wird das Wood-Mega-Therm Element mit einer 10 cm Holzweichfaserplatte und der Fassade beplankt.

Tabelle 12: Wandaufbau Wood-Mega-Therm

Position	Dicke [cm]	Bauteilbezeichnung
1	5	Lehmbauplatte
2	2	Sägeraue Nut-Feder Bretter
3	17,2	V förmige KVH Tragkonstruktion, Hohlräume ausgefacht mit Holzweichfaserdämmung
4	2	Sägeraue Nut-Feder Bretter
5	10	Holzweichfaserplatte
6	3	Hinterlüftungsebene
7	2,5	Fassaden-Schalung
Σ	**41,7**	**[cm]**
U-Wert	**0,17**	**[W/m²K]**

4.9.3 Deckenaufbau

Wird Wood-Mega-Therm als Decke verwendet, werden die Hohlräume auf der Oberseite mit einer Kiesschüttung versehen. An der Unterseite werden 8 cm dicke Holzweichfaserplatten eingelegt (Abbildung 50). Dieser asymmetrische Aufbau wird bereits im Werk erstellt und fertig auf die Baustelle geliefert. Dort wird aus Brandschutzgründen an der Unterseite der Decke noch eine Gipsfaserplatte montiert. Die Deckenoberseite wird aus einer 32 cm Holzweichfaserplatte, 2 cm Estrichziegeln und den Bodenbelag aufgebaut.

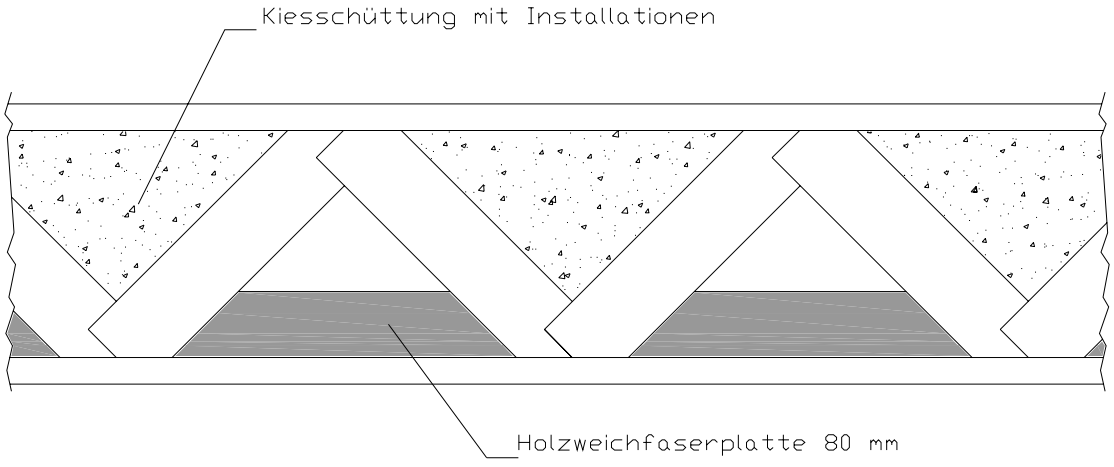

Abbildung 50: Deckenaufbau Wood-Mega-Therm (e.A.).

Einfluss des Wärmespeichervermögens auf die Raumtemperatur unter dynamischen Bedingungen

5. Einfluss des Wärmespeichervermögens auf die Raumtemperatur unter dynamischen Bedingungen

Die mangelnde Beachtung bauphysikalischer Aspekte in der Vergangenheit hat dem Holzbau einen schlechten Ruf eingebracht. Barackenklima und Zugerscheinungen werden oft mit dem Holzbau assoziiert. Der Rohstoff Holz sowie die Eigenschaften von Holzwerkstoffen ermöglichen bei sorgfältiger Planung und Ausführung den Bau von qualitativ hochwertigen Bauwerken (Grobbauer 2008).

In diesem Teil der Arbeit werden die Auswirkungen der Wärmespeicherfähigkeit von unterschiedlichen Baumaterialen auf die Raumtemperatur im Hinblick auf sommerliche Überwärmung untersucht. Die Untersuchungen wurden mit einer Simulationssoftware, die in der Bauphysik eingesetzt wird, durchgeführt.

Bevor mit den Berechungen begonnen wird, werden zunächst die Grundlagen des sommerlichen Wärmeschutzes erklärt und danach in einem kurzen Glossar die wichtigsten Kennwerte dazu dargestellt.

5.1 Bauphysikalischen Grundlagen - Wärmeschutz[11]

Der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes gewinnt im zunehmenden Maße, vor allem im Sommer, an Bedeutung.

Faktoren wie die globale Erwärmung, die Zusammenhänge zwischen operativer Raumtemperatur und Leistungsfähigkeit sowie den erhöhten Ansprüche an den Klimakomfort bestätigen dies. Die Abweichungen von der Idealtemperatur sind im Sommer in Mitteleuropa zwar geringer als im Winter, der Mensch kann sich aber wesentlich besser gegen zu geringe als gegen zu hohe Temperaturen schützen.

Vom technischen Standpunkt aus betrachtet, ist die Erzeugung von Wärme mit geringerem Aufwand verbunden als die Kühlung, welche nur durch einen Wärmeabtransport erfolgen kann. Gebäude, welche als klimatisch regulierende Systeme auch im Sommer möglichst behagliche Innenraumtemperaturen sicherstellen, sollen so geplant und dimensioniert werden, dass eine Überhitzung auch ohne aufwendige technische Systeme vermieden werden kann.

Die Raumtemperatur ist abhängig von den wirksamen Wärmelasten, wobei man interne und externe Lasten unterscheidet. Die **internen Wärmelasten** sind abhängig vom Nutzer und werden durch Personen, Beleuchtung und elektrische Geräte verursacht. **Externe Lasten** sind durch die Gebäudehülle beeinflussbar und gliedern sich in Wärmetransmission, solare Einstrahlung und Wärmeeintrag durch Lüftung. Sobald die Außentemperatur über der Innentemperatur liegt, stellt

[11] Hegger et al. 2008

sich eine **Wärmetransmission** in das Innere der Gebäudehülle ein. Zur Vermeidung dieser Art des Wärmeeintrages gelten dieselben Grundlagen wie bei dem winterlichen Wärmeschutz, nämlich Vermeidung der Wärmetransmission durch einen niedrigeren U-Wert der Gebäudehülle. Dieser Faktor ist mit der Entwicklung zum Passivhaus bereits im hohen Maße ausgeschöpft.

Die **solare**n **Wärmeeinträge** durch transparente Bauteile stellen in den meisten Fällen den größten Anteil in der sommerlichen Wärmebilanz eines Gebäudes dar. Durch die Abwägung aller Funktionen der Verglasung wie passive Sonnenenergienutzung, Durchsicht, Tageslichtnutzung etc. haben sich für Südfassaden Fensterflächenanteile von 50% als sinnvoll erwiesen. Bei Ost-Westfassaden gelten bereits Anteile von >30% als kritisch. Die Nordfassade ist für den sommerlichen Wärmeschutz von untergeordneter Bedeutung.

Als Sonnenschutz zur Abminderung der solaren Einstrahlung gibt es verschiedene Systeme, welche hier vereinfacht in die drei Gruppen eingeteilt werden. Die erste Gruppe bildet die **bauliche Verschattung,** welche durch Überstände, Rücksprünge bzw. vorgesetzte Balkone gebildet wird. Im folgenden Simulationsteil wird die bauliche Verschattung als Vorsprung bezeichnet.

Diese baulichen Maßnahmen können sehr gut für extreme Sonnenstände optimiert werden (Sommer- und Wintersonnenwende) in den Übergangszeiten (Frühjahr und Herbst) ergibt sich oftmals ein eingeschränkte Wirksamkeit.

Die zweite Gruppe bilden die **Verschattungssysteme**, die an der **Außenseite des Fensters** liegen. Diese bilden grundsätzlich die höchste Sonnenschutzwirkung und werden laut ÖNORM 8110-3 mit einem Verschattungsfaktor von 73 % in Rechnung gestellt. Die Ausführungsformen können sehr unterschiedlich sein, wobei an dieser Stelle nur die Lamellenjalousie erwähnt wird, welche sich sehr flexibel auf unterschiedliche Einstrahlungssituationen einstellen lässt. Ein Vorteil ist, dass sich die Fenster bei aktiviertem Sonnenschutz nach innen öffnen lassen. Nachteile hingegen sind, dass Lamellenjalousien sehr anfällig gegenüber Wind sind.

Die dritte Gruppe sind die Verschattungssysteme, welche an der **Innenseite des Fensters** liegen. Diese sind unanfällig gegenüber Wind und Verschmutzungen, leisten aber als Schutz gegen sommerliche Überwärmung den kleinsten Beitrag, der hier aufgelisteten Sonnenschutzsysteme, weil die solare Einstrahlung erst in der Gebäudehülle in langwellige Wärmestrahlen umgewandelt wird. Es wird zwar ein Teil der Einstrahlung durch die Innenverschattung wieder durch das Fenster nach außen reflektiert, aber Absorption in den Glasscheiben und am Sonnenschutz selbst führen zu einer maßgeblichen Erwärmung der Raumtemperatur. Laut ÖNORM 8110-3 werden innenliegende

Verschattungsysteme wie Markisen, mit einem Verschattungsfaktor von nur 25 % in Rechnung gestellt.

Die **Wärmespeicherfähigkeit** der raumumschließenden Bauteile und die Gebäudelüftung sind weitere wichtige Parameter zur Vermeidung der sommerlichen Überhitzung. Bei zu geringen Speichermassen führt die Summe der Wärmeeinträge sehr schnell zu unbehaglicher Überhitzung der Raumluft (Barackenklima). Ist hingegen eine ausreichende Speichermasse vorhanden, wie zum Beispiel durch massive Decken-, Wand- und Bodenbauteile, kann ein Teil der Wärmemenge zwischengespeichert werden und zeitversetzt wieder abgegeben werden.

Hohe speicherwirksame Massen verhindern Überhitzung nicht, sie verschieben die maximale Raumtemperatur nur um mehrere Stunden. Optimal wäre somit eine Wärmespeicherung bis die Außentemperatur in den Abendstunden unter die des Innenraums fällt und durch relativ einfache und energieextensive Nachtlüftung aus dem Gebäude abgeführt werden kann. Entscheidend für die Wirksamkeit von Speichermassen ist deren thermische Verbindung mit dem Innenraum. Aufgeständerte Böden (Distanzböden), abgehängte Decken oder Vorsatzschalen an den Wänden unterbinden den Wärmefluss zwischen Raumluft und Speichermasse und dämmen damit die Speichermasse der Bauteile weg. Der Einsatz von speicherwirksamen Massen hat Konsequenzen für die Raumgestaltung. Dies muss den Nutzern der Objekte bewusst sein und von ihnen respektiert werden, damit die geplanten Potentiale voll ausgeschöpft werden können.

Neben den bereits angesprochenen externen Wärmeeinträgen durch Transmission und solare Einträge kann eine zusätzliche unerwünschte Wärmezufuhr auch über den erforderlichen **hygienischen Luftwechsel** erfolgen. Konvektive Wärmeeinträge treten auf, wenn die Außenlufttemperatur über der Raumtemperatur liegt und direkt dem Raum zugeführt wird. Eine Optimierung des Luftaustauschs kann über eine thermische Vorkonditionierung wie zum Beispiel einen Erdkanal erfolgen.

Schwere Materialien wie Naturstein oder Beton besitzen aufgrund ihrer hohen Rohdichte gute Speichereigenschaften, aber auch Holz bietet sich zur Speicherung von Wärme an. Organische Materialien verfügen über eine höhere spezifische Wärmekapazität als massive mineralische Baustoffe d.h. sie können in der Regel pro Kilogramm Gewicht mehr Wärmeenergie aufnehmen (Tabelle 13).

Tabelle 13: Vergleich der Rohdichte und Wärmekapazität von Baustoffen (Hegger et al. 2008)

Werkstoff	Rohdichte ρ [kg/m³]	Wärmekapazität c [kJ/(kgK)]
Naturstein	2700	1
Beton	2300	1
Holzbeton	1100	1,2
Holz	500	1,6
Wasser, flüssig	1000	4,2

Die gespeicherte Wärme wird nach einer gewissen Zeit vom Material weitgehend in der Form von Strahlungswärme emittiert. Als Bestandteil der operativen (gefühlten) Temperatur ermöglicht dies unter Umständen eine Absenkung der Raumlufttemperatur bei gleich empfundener Temperatur.

Der Zeitraum zwischen Energieabsorption und –emission wird als **Phasenverschiebung** bezeichnet. Dort wo die Energiebilanzen vor allem durch äußere Einflüsse, wie im Wohnungsbau, bestimmt werden, lässt sich die Phasenverschiebung durch das Material gut nutzen. Bauteile mit hoher Speicherwirksamer Masse führen zu einer Aufnahme der solaren Spitzeneinträge und zu einer zeitversetzten Abgabe solarer Energien an den Raum und ermöglichen das Konzept der Nachtlüftung. Die Phasenverschiebung ist besonders hoch, wenn das Material über eine hohe Speicherfähigkeit bei gleichzeitig geringer Wärmeleitung verfügt. Eine geringe **Temperaturleitfähigkeit** zeigt dabei eine hohe Phasenverschiebung des Materials an. Dämm- und Speicherwirkung in einem Material schließen sich weitgehend aus. Eine Ausnahme bildet Holz und Dämmstoffe aus Holz.

5.2 Glossar - Wärmeschutz[12]

Eine Übersicht über die wärmetechnischen Kennwerte verschiedener Materialien, welche in diesem Glossar beschrieben werden findet man in Tabelle 14.

Dabei gibt der **Wärmedurchgangskoeffizient** ($U = Q/(A\ \Delta T)$ [$W/(m^2\ K)$]) an, wie hoch der Wärmefluss (Q [W]) durch eine Fläche (A [m^2]) ist, wobei eine konstante Temperaturdifferenz (ΔT [K]) (stationäre Bedingung) der angrenzenden Luftschichten das antreibende Potenzial ist.

Er nimmt mit der **Wärmeleitfähigkeit** (λ [W/(m K)]) zu (Dämmstoffe ~0,035 – 0,040, Holzwerkstoffe ~0,1 – 0,2, Stahlbeton ~2,3). Gegen den Wärmestrom wirkt die Dicke der Bauteilschichten. Durch Holzwerkstoffe fließt in der gleichen Zeit die 2 – 5-fache, durch Beton die 60-fache Wärmemenge wie durch eine gleich dicke Wärmedämmschicht.

Die vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit von Holz und die träge Wärmespeicherung entschärfen konstruktive **Wärmebrücken** (Schimmelbildung, Wärmeverluste). Zunehmender Wärmeschutz (Niedrig- und Passivhäuser) erfordert die Minimierung des Einflusses von Wärmebrücken auch im Holzbau.

Das **Erwärmen von Bauteilen** erfolgt durch Beheizen oder durch Sonneneinstrahlung als instationärer (dynamischer) und periodischer Prozess mit Wärmezufuhr (Beheizen, Besonnen) und Wärmeabgabe (Nachtabsenkung, Beschattung, Nachtlüftung). Die Wärme wird direkt oder über die Luft an den Bauteil abgegeben. Zum wirkungsvollen Wärmeübergang zwischen Bauteilen und Luft ist eine Temperaturdifferenz von 3 – 4 K erforderlich. Während einer Tagesperiode (24h) dringt die Wärme in mineralische Schichten 10 – 15 cm tief ein. Bei Holzbauteilen ist diese Eindringtiefe geringer, somit kann auch nur eine geringere Speichermasse genutzt werden.

Im Winter ermöglichen **Wärmespeichermassen** die rasche Wiedererwärmung der Raumluft nach Stoßlüften, im Sommer reduzieren sie tagsüber die Erwärmung der Raumluft und werden durch Nachtlüftung abgekühlt. Jedes Material hat die Fähigkeit, Wärme aufzunehmen und zu speichern (ΔQ [J] = m c_p $\Delta\vartheta$) Wärmeeinträge durch die Fenster und opake Bauteile müssen gering gehalten werden. Maßgeblich für opake Bauteile sind die Bauteilkennwerte **Temperaturamplitudendämpfung** (TAV = A_e/A_i [-]) – das Verhältnis der maximalen Erwärmung (Amplitude) der äußeren (A_e) zu der inneren Bauteiloberfläche (A_i) – und **Phasenverschiebung** (φ [h]) – die zeitliche Verschiebung des inneren zum äußeren Maximum (Abbildung 51). Die TAV ist umso größer, je größer die Speichermasse und die Wärmedämmung eines

[12] Grobbauer (2008)

Bauteils sind. Die Phasenverschiebung verlängert sich mit der Zunahme der Wärmespeichermassen im Bauteil.

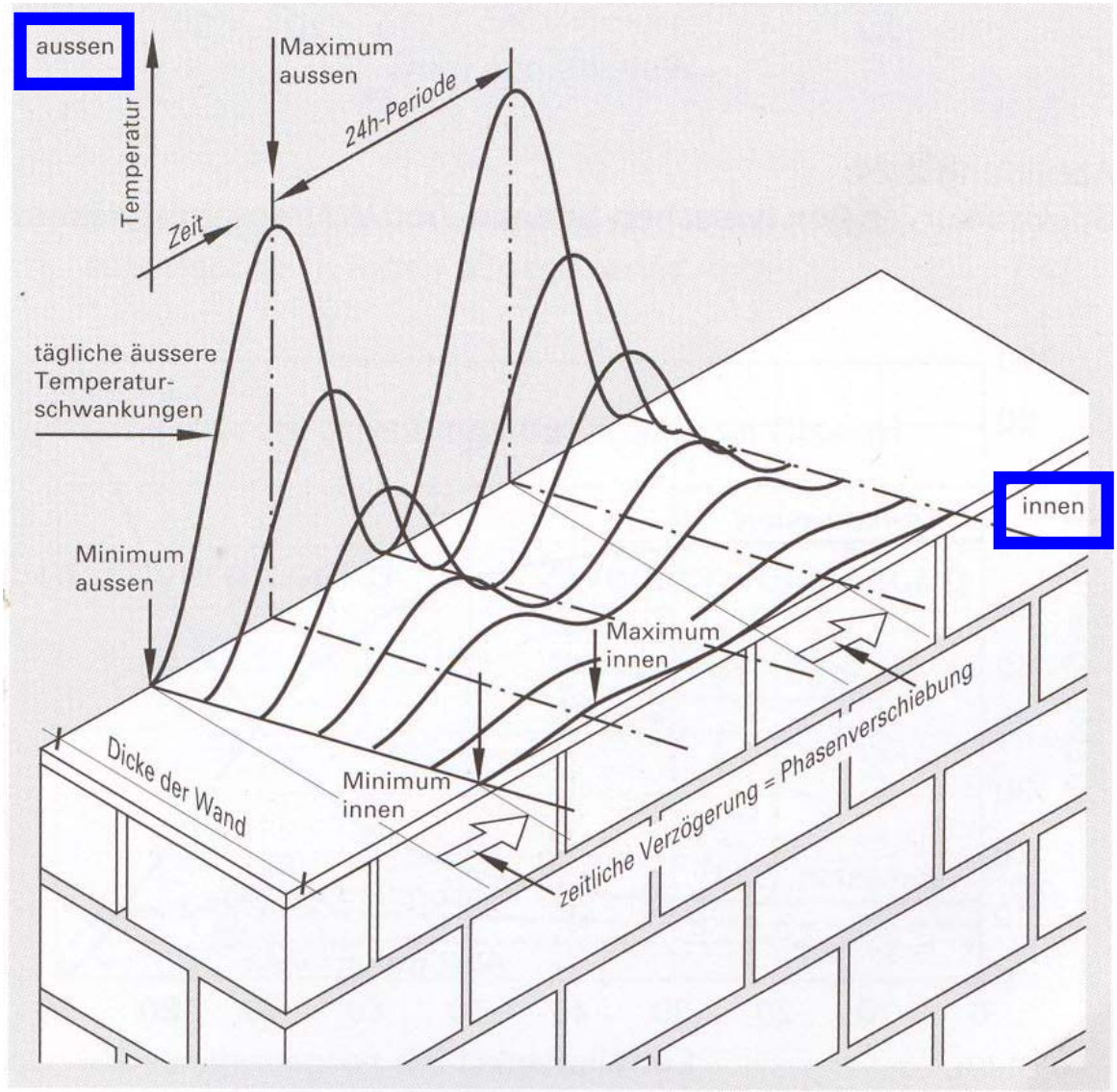

Abbildung 51: Periodischer Wärmedurchgang (Temperaturamplitudendämpfung und Phasenverschiebung) (Zürcher und Frank 1998).

Rohdichte, spezifische Wärmekapazität und **Wärmeleitfähigkeit** bilden die Basis des dynamischen Verhaltens:

Die **Rohdichte** (ρ [kg/m^3]) von Holz (Fichte ~500) und Holzwerkstoffen liegt je nach Dichte der Faseranordnung und Leimanteil zwischen 400 und 780 kg/m^3 (Dämmstoffe ~15 – 120, Stahl ~7800). Dies und die Festigkeitswerte erklären die Eignung von Holz für den Leichtbau.

Die **spezifische Wärmekapazität** (c_p [kJ/(kg K)]) gibt an, welche Wärmemenge [kJ] zum Erwärmen eines Stoffes (Masse [kg]) um ein Kelvin [K] zugeführt

werden muss (Mineralische Stoffe ~1, Holzwerkstoffe ~1,6 – 2,5, Stahl ~0,46, Wasser ~4,2). Um dieselbe Masse an Holz zu erwärmen, ist ungefähr die doppelte Wärmemenge wie für Beton, die vierfache wie für Stahl und ca. die halbe wie für Wasser erforderlich. Daraus resultiert das im Vergleich zu mineralischen Stoffen wärmeträge Verhalten von Holzbauteilen.

Die **Wärmespeicherungszahl** (s [kJ/(m^3 K)]) gibt die zum Erwärmen auf ein Volumen bezogene erforderliche Wärmemenge an (Mineralische Stoffe ~800 – 3000, Holzwerkstoffe ~1300 – 1600, Stahl ~3600, Wasser ~4190). Sie ist proportional zur Rohdichte und zur spezifischen Wärmekapazität. Temperaturänderungen breiten sich in einem Stoff umso schneller aus, je höher Wärmeleitfähigkeit und je geringer Rohdichte und spezifische Wärmekapazität sind. Diesen Zusammenhang bildet die **Temperaturleitfähigkeit** (a [m^2/h]) ab (Holz (Fichte) ~0,00047, Stahlbeton ~0,00308, Stahl unlegiert ~0,0602), die u.a. die Basis der Berechnung der Phasenverschiebung darstellt. Die Temperaturleitfähigkeit ist also in Beton ~7-mal, in Stahl ~130-mal so groß wie in Massivholz. Holz reagiert also träge auf Erwärmen und Abkühlen, stellt somit eine langsam reagierende Wärmespeichermasse dar.

Der **Wärmeeindringkoeffizient** (b [kJ/(m^2 $h^{0,5}$ K)] gibt an, wie rasch ein Stoff Wärme speichert bzw. Wärme ableitet (Holz ~20, Holzwerkstoffe ~20 – 30, Stahlbeton ~150, Stahl ~880, Aluminium ~1.350). Stoffe mit einem Wärmeeindringkoeffizienten bis 20 werden oberflächlich sehr rasch warm, weil die Wärme nur langsam nach innen geleitet wird (Wärmestau), bei Werten von 20 bis 50 ergibt sich eine angenehme (fußwarme) Oberfläche, bei Werten über 50 wirkt die Oberfläche kalt, und über 150 wird der Wärmeabfluss am Körper als unangenehm empfunden. Daher eignen sich Holzwerkstoffe gut für Boden- und Wandbeläge sowie Sitzflächen. Metallische Bodenbeläge sollten von Wärme ableitenden Untergründen durch Holzwerkstoffe oder Wärmedämmungen getrennt werden.

Die **Eindringtiefe** (δ [m]) ist diejenige Tiefe in einem halbunendlichen Baustoff, bei der die Temperaturschwankung auf 1/e, dies entspricht 36,8 % des Wertes der Oberflächetemperaturschwankung, abgeklungen ist (Abbildung 52) (Zürcher und Frank 1998).

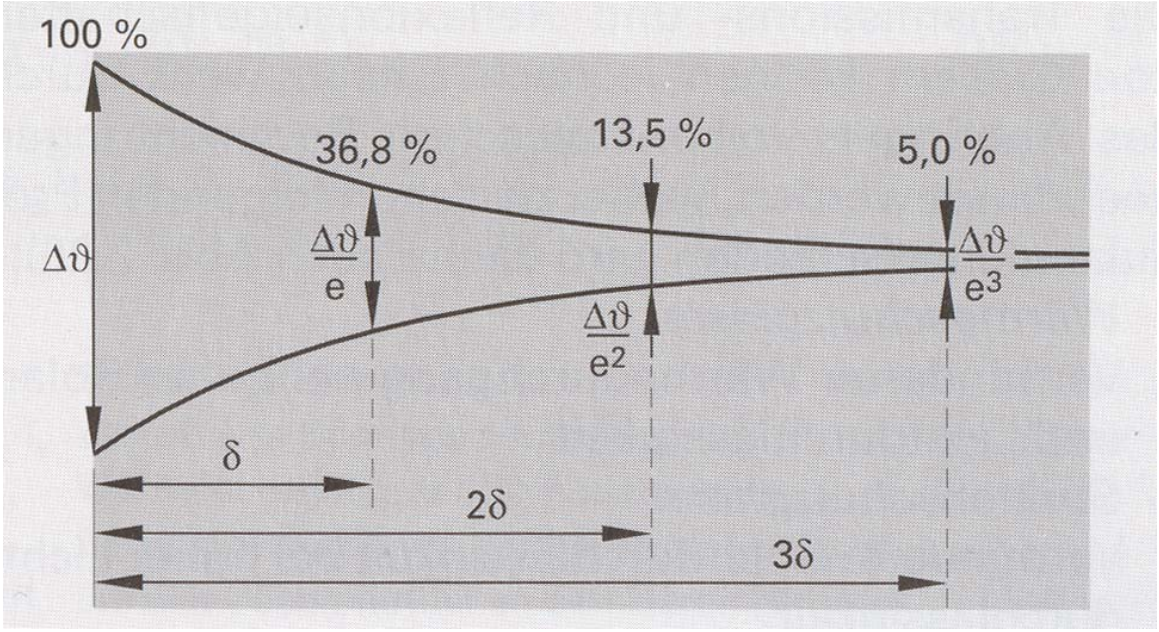

Abbildung 52: Definition der Eindringtiefe (Zürcher und Frank 1998)

In Bezug auf das Temperaturempfinden von Personen wird die gefühlte oder **operative Raumtemperatur** angegeben. Da Körper sowohl über Konvektion als auch über Strahlung im Wärmeaustausch stehen, werden üblicherweise die beiden Teile zu je 50 % in der operativen Raumtemperatur berücksichtigt (Liersch und Langner 2006).

Im anschließenden Teil der Arbeit über die dynamische Simulation von Gebäuden sind alle Innentemperaturen als operative Raumtemperaturen angegeben.

Tabelle 14: Wärmetechnische Kennwerte verschiedener Materialien (* nach Waltjen et al. 2008)

	Wärmeleit-fähigkeit*	Roh dichte*	spez. Wärme-kapazität*	Wärmespeicher-ungszahl	Temperatur-leitfähigkeit	Wärmeeindring-koeffizient	Eindringtiefe
				$(s=c_p \rho)$	$(a=\lambda/(c_p \rho))$	$(b=\sqrt{(\lambda/(c_p \rho))})$	$(\delta=\sqrt{((\lambda T)/(\rho\ c_p \pi))})$
	λ	ρ	c_p	s	a	b	δ (für T=24h)
	[W/(m K)]	[kg/m³]	[kJ/(kg K)]	[kJ/(m³ K)]	[m²/h]	[kJ/(m² K $h^{0,5}$)]	[m]
Holz (Fichte) techn. getrock.	0,13	500	2	1000	0,00047	21,63	0,06
Holzwolleleichtbauplatte, zementgebunden	0,1	400	1	400	0,00090	12,00	0,08
DWD-Platte	0,08	780	2	1560	0,00018	21,20	0,04
OSB-Platte	0,13	660	2	1320	0,00035	24,85	0,05
Spanplatte V100 PF	0,13	690	2	1380	0,00034	25,41	0,05
Gipskartonplatte	0,21	850	1,05	892,5	0,00085	25,98	0,08
Gipsfaserplatte	0,36	1180	1,05	1239	0,00105	40,07	0,09
Lehmputz	0,81	1700	0,94	1598	0,00182	68,26	0,12
Floatglas	1	2500	0,75	1875	0,00192	82,16	0,12
Stahlbeton	2,3	2400	1,12	2688	0,00308	149,19	0,15
Klinkerziegel	1	2000	0,9	1800	0,00200	80,50	0,12
Hochlochziegel	0,27	800	1	800	0,00122	27,89	0,10
Polystyrol EPS F (für Fassaden)	0,04	18	1,45	26,1	0,00552	1,94	0,21
Glaswolle MW-W	0,036	25	1,03	25,75	0,00503	1,83	0,20
Hanfdämmplatte m. Stützfasern	0,04	30	1,55	46,5	0,00310	2,59	0,15
Korkdämmplatte	0,04	120	1,67	200,4	0,00072	5,37	0,07
Schafwolle-Dämmfilz	0,04	30	1,5	45	0,00320	2,55	0,16
Zellulosefaserflocken	0,04	35	1,9	66,5	0,00217	3,09	0,13
Aluminiumblech	200	2800	0,9	2520	0,28571	1347,00	1,48
Stahl, unlegiert (<1%)	60	7800	0,46	3588	0,06020	880,35	0,68
Stahl, niederlegiert (<5%)	48	7800	0,46	3588	0,04816	787,40	0,61
Stahl, hochlegiert (>5%)	15	7800	0,46	3588	0,01505	440,17	0,34
Wasser, flüssig (10°C)	0,6	1000	4,19	4190	0,00052	95,13	0,06
Luft	0,025	1	1,008	1,008	0,08929	0,30	0,83

5.3 Thermische Simulation unter dynamischen Bedingungen

Für die Erfassung vom dynamisch thermischen Verhalten von Gebäuden gibt es eine Vielzahl von Softwarepaketen, welche die Ermittlung des Temperaturverlaufs ermöglichen (Zürcher und Frank 1998).

Die Gebäudesimulation in dieser Arbeit wurde am Österreichischen Institut für Baubiologie und -ökologie (IBO) mit der Software TRNSYS (Version 16) der Firma Transsolar durchgeführt.

Eine Simulation ist der Versuch, ein möglichst genaues aber vereinfachtes Abbild der thermischen Zusammenhänge mithilfe der zugrunde liegenden physikalischen Vorgänge zu erstellen. Die Ergebnisse sollen orientierende Anhaltspunkte liefern.

In dieser Arbeit wurden drei Raummodelle mit unterschiedlichen Wand- und Deckenaufbauten in Abhängigkeit einer veränderlichen Variable simuliert.

Bei den angenommen Wand- und Deckenaufbauten sowie den Qualitäten der Verschattung wurden bewusst Extremata gewählt. So wird bei den Bauweisen die Holzleichtbauweise der Stahlbetonbauweise und der Massivholzbauweise gegenübergestellt. Bei den Verschattungsfaktoren der Außen- und Innenverschattungen wurden die der ÖNORM B 8110-3 verwendet. Die Ventilation wurde in der Simulation mit unterschiedlichen Luftwechselraten betrieben.

Alle Simulationen in dieser Arbeit beschäftigen sich mit der Problematik der sommerlichen Überwärmung und möglichen Strategien um dieser entgegenzuwirken.

Als Wetterdaten wurde der eingeschwungene Sommerzustand des Datensatz nach ÖNORM B 8110-3 verwendet.

5.3.1 Raummodell

Die Abmessungen des Raummodells wurden aus ClimaSkin (Hausladen et al. 2006) übernommen (Tabelle 15, Abbildung 53). Es handelt sich dabei um einen Raum in einem mehrgeschossigen Gebäude, der eine Außenwand aufweißt, die nach Süden ausgerichtet ist. In der Wand befindet sich ein Fenster mit einer Größe von 4 m² (dies entspricht ~30 % der Wandfläche) (Tabelle 16). Alle anderen Wände sind Innenwände und Grenzen an Räume, die zu jedem Zeitpunkt die gleiche operative Raumtemperatur aufweisen wie der Raum in der Simulation. Die gleiche Situation ergibt sich auch für die Decke. Es handelt sich um eine Zwischengeschoßdecke, die sowohl nach oben als auch nach unten an Räume mit derselben operativen Temperatur grenzt, d.h. ein Wärmestrom stellt sich nur durch die Außenwand und das Fenster in Abhängigkeit der herrschenden Temperaturen und Einstrahlungen ein. Der Raum weist keine Türe auf und verfügt über keinen Luftaustausch mit den umgebenden Räumen. In der Simulation wurden keine Wärmequellen im Raum berücksichtigt, d.h. im Raum befinden sich keine elektrischen Geräte wie Beleuchtungskörper, Computer, Drucker, Kochplatten etc. oder Personen darin. Es handelt sich damit um einen leeren Raum, der über keine Energieversorgung verfügt. Die Erwärmung des Raums erfolgt ausschließlich durch solare Gewinne.

Tabelle 15: Kennwerte Raummodell

	Tiefe [m]	Breite [m]	Höhe [m]
Innenabmessungen	5	4,5	3
Fläche	22,5 m²		
Volumen	67,5 m³		

Tabelle 16: Kennwerte Fenster

Fläche [m²]	U-Wert [W/(m² K)]	g-Wert [-]
4	0,68	0,407

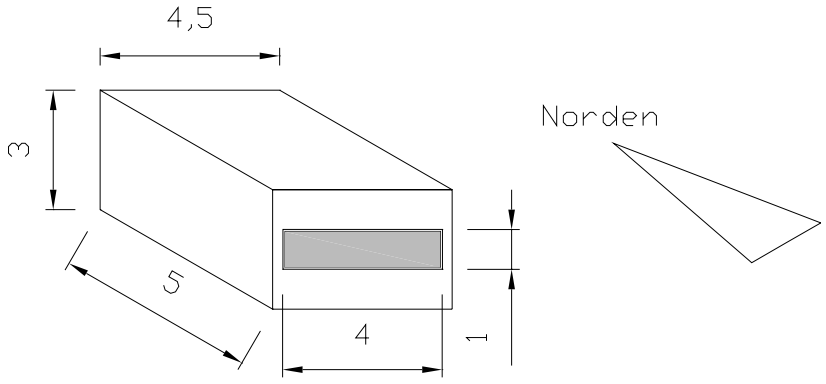

Abbildung 53: Raummodell (Angaben in [m]) (e.A.)

5.3.2 Wand- und Deckenaufbauten

Alle Aufbauten der Außenwände (AW) und der Geschoßdecken (GD) wurden dem Passivhaus-Bauteilkatalog (Waltjen et al. 2008) entnommen. Die Aufbauten der Innenwände (IW) von Stahlbetonbauweise und Holzmassivbauweise wurden vom Autor gewählt um ein konsistentes Raummodell generieren zu können.

Die hier angeführten Schichtaufbauten stammen wie bereits erwähnt vom Passivhaus-Bauteilkatalog, wobei die in der Simulation verwendeten Schichtaufbauten davon abweichen können. Bei den Aufbauten der Bauweisen wird auf die Unterschiede jeweils hingewiesen.

Allgemein kann gesagt werden, dass alle Folien, Dampfsperren und eventuelle Klebeschichten bei der Simulation nicht berücksichtigt worden sind. Als Fußbodenbelag wurde ein Fertigparkett aus Laubholz mit 1 cm Dicke angenommen. Hinterlüftete Fassaden wurden durch einen abgeschwächten konvektiven Wärmeübergang berücksichtig und sind daher nicht im Schichtaufbau ersichtlich.

Detaillierte Angaben zu dem verwendeten Schichtaufbau und den Parametern im Simulationsprogramm sind im Anhang A2 Parameter der TRNSYS Simulation aufgelistet (Tabelle 26).

5.3.2.1 Aufbau Stahlbetonbau

Die Außen- und Innenwand wurde in den Simulationsaufbau bezüglich der Abfolge der Bauteilschichten wie hier angegeben übernommen. Bei der Geschoßdecke wurden alle Folien und die Spachtelung an der Deckenunterseite weggelassen (Abbildung 54; Tabelle 17).

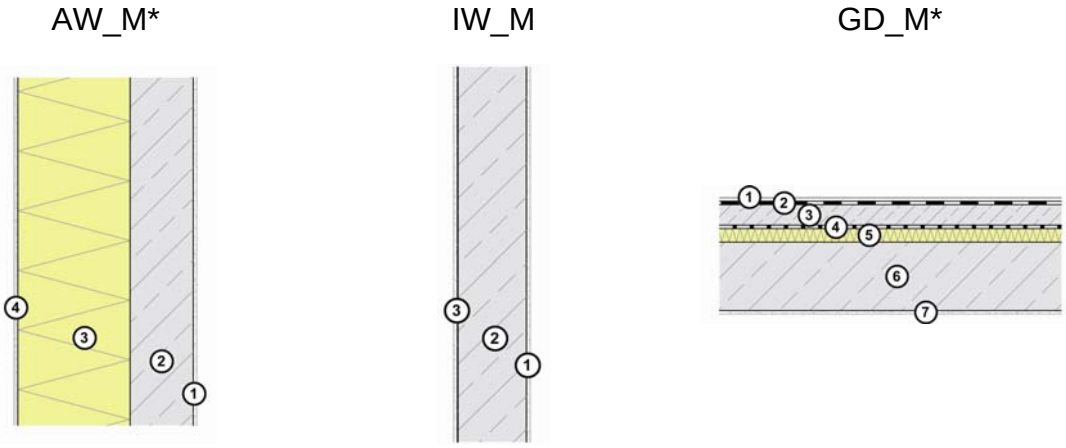

Abbildung 54: Stahlbetonbauweise – Außenwand (AW_M), Innenwand (IW_M) und Geschoßdecke (GD_M); Anmerkung: Bei den Wänden ist die Raumzugewandte Seite rechts (*Waltjen et al. 2008).
AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _M = Stahlbetonbauweise

Tabelle 17: Stahlbetonbauweise – Schichtaufbau (*Waltjen et al. 2008)
Aufbau der Wände von innen nach außen, bei der Geschoßdecke von oben nach unten.
AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _M = Stahlbetonbauweise

Bauteil-bezeichnung	Position	Dicke [cm]	Schichtbezeichnung
AW_M*	1	-	Spachtelung
	2	18	Stahlbeton
	3	32	EPS-F, expandierter Polystyrol-Hartschaum
	4	-	Silikatputz
IW_M	1	-	Spachtelung
	2	18	Stahlbeton
	3	-	Spachtelung
GD_M*	1	-	Fußbodenbelag
	2	-	Flüssige Folie
	3	6	Zementestrich
	4	-	PE-Folie
	5	4	EPS-Trittschalldämmplatte
	6	20	Stahlbeton
	7	-	Spachtelung

5.3.2.2 Aufbau Holzleichtbau

Bei einer Simulation handelt es sich wie schon in der Einleitung zum Bauphysik Teil dieser Arbeit erwähnt um ein vereinfachtes Abbild der Realität. Diese Vereinfachung trifft vor allem auf unstetige Bauteilschichten, wie sie im Holzrahmenbau vorkommen, zu. Ein Bauteil kann aus mehreren aufeinander folgenden Schichten von unterschiedlichen Materialien bestehen. Eine Schicht darf aber immer nur aus einem Material bestehen. Inhomogene Schichten sind im Holzleichtbau üblich und konnten bei der Simulation nicht berücksichtigt werden. So wurden weder der Holzrahmen in den Wänden noch Querlattungen, an denen die Gipskartonplatten und die Außenfassade befestigt sind, berücksichtigt. In der Geschoßdecke verhält es sich ähnlich, hier konnten die tragenden Sparren nicht berücksichtigt werden. Dies führt, wenn es um das Thema sommerliche Überhitzung geht, wie in dieser Arbeit, zu einer schlechteren Bewertung (extrem starke Überhitzung) des Holzleichtbaus, da dieser damit nahezu keine speicherwirksamen Massen mehr besitzt (Abbildung 55; Tabelle 18).

AW_L IW_L GD_L

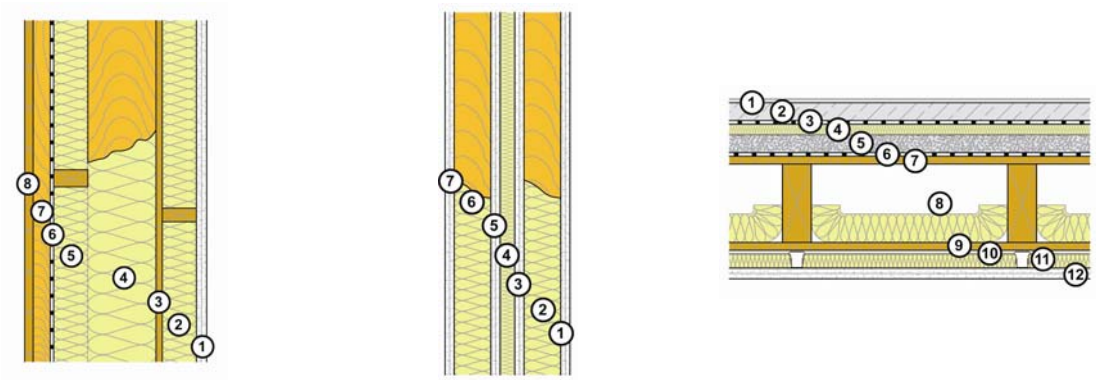

Abbildung 55: Holzleichtbauweise - Außenwand, Innenwand und Geschoßdecke; Anmerkung: Bei den Wänden ist die Raumzugewandte Seite rechts (Waltjen et al. 2008) AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _L = Holzleichtbauweise

Tabelle 18: Holzleichtbauweise – Schichtaufbau (Waltjen et al. 2008)
Aufbau der Wände von innen nach außen, bei der Geschoßdecke von oben nach unten.
AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _L = Holzleichtbauweise

Bauteil-bezeichnung	Position	Dicke [cm]	Schichtbezeichnung
AW_L	1	3	2 Lg. Gipskarton-Brandschutzplatten
	2	10	Mineralwolleplatten zw. horizontalen Latten (Installationsebene)
	3	1,8	OSB-Platte
	4	18	Mineralwolleplatten zw. vertikalen Pfosten
	5	10	Mineralwolleplatten zw. horizontalen Latten
	6	-	Windsperre, diff. offen, wasserabweisend
	7	5	Hinterlüftung zw. senkrechten Holzlatten
	8	2,5	Holzschalung
IW_L	1	2,5	2 Lg. Gipskarton-Brandschutzplatten
	2	10	Mineralwolle zw. Holzstehern 6/10
	3	2,5	2 Lg. Gipskarton-Brandschutzplatten
	4	4	Mineralwolle
	5	2,5	2 Lg. Gipskarton-Brandschutzplatten
	6	10	Mineralwolle zw. Holzstehern 6/10
	7	2,5	2 Lg. Gipskarton-Brandschutzplatten

GD_L	1	-	Fußbodenbelag
	2	5	Zementestrich
	3	-	PE-Folie
	4	3	Mineralwolle-Trittschalldämmplatte
	5	5	Splitschüttung, leicht gebunden
	6	-	Rieselschutz
	7	2,2	OSB-Platte
	8	22	Holz-Sparren, dazw. 8 cm Mineralwolle
	9	2,2	OSB-Platte
	10	1	Luftspalt
	11	4	Mineralwolle
	12	3	2 Lg. Gipskarton-Brandschutzplatten auf Schwingbügel

5.3.2.3 Aufbau Holzmassivbau

Für die unstetigen Bauteilschichten im Holzmassivbau gilt das gleiche wie für den Holzleichtbau, nämlich dass die C-Träger in der Außenwand und die Querlattungen der der Installationsebene an der raumabgewandten Seite der Innenwand nicht berücksichtigt wurden (Abbildung 56; Tabelle 19).

AW_H* IW_H GD_H*

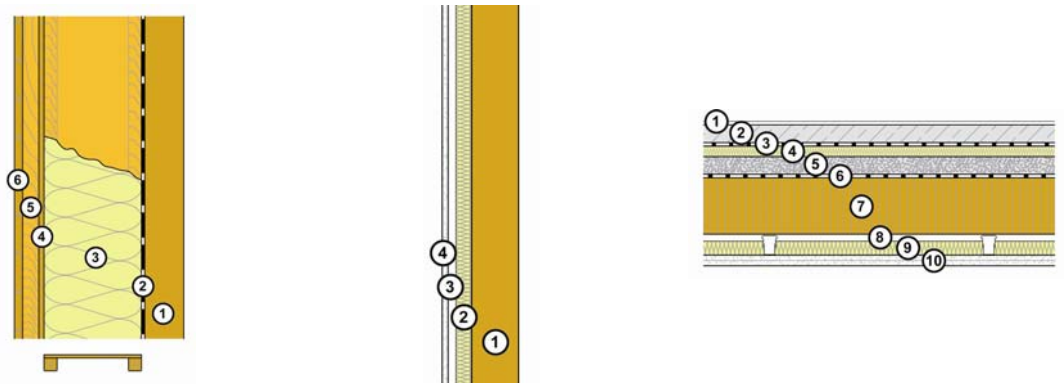

Abbildung 56: Holzmassivbauweise – Außenwand, Innenwand und Geschoßdecke
Anmerkung: Bei den Wänden ist die Raumzugewandte Seite rechts (*Waltjen et al. 2008)
AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _H = Holzmassivbauweise

Tabelle 19: Holzmassivbauweise – Schichtaufbau (*Waltjen et al. 2008)
Aufbau der Wände von innen nach außen, bei der Geschoßdecke von oben nach unten.

Bauteil-bezeichnung	Position	Dicke [cm]	Schichtbezeichnung
AW_H*	1	12	Brettstapelwand, vernagelt
	2	-	PE-Dampfbremse
	3	30	Mineralwolle zwischen Holz C-Trägern
	4	1,6	MDF-Platte
	5	5	Hinterlüftung zw. senkrechten Holzlatten
	6	2,5	Holzschalung

IW_H	1	12	Brettstapelwand, vernagelt
	2	4	Mineralwolle
	3	2	Luft
	4	1,5	Gipskartonplatte
GD_H*	1	-	Fußbodenbelag
	2	5	Zementestrich
	3	-	PE-Folie
	4	3	Mineralwolle-Trittschalldämmplatte
	5	5	Schwere Splittschüttung
	6	-	Rieselschutz
	7	16	Brettstapeldecke, genagelt
	8	1	Luftspalt
	9	4	Mineralwolle
	10	3	2 Lg. Gipskarton-Brandschutzplatten auf Schwingbügel

5.3.2.4 Aufbauten mit Vorsatzschalen

Jede der vier im Folgenden beschrieben Simulationsmodelle wurde zuerst mit den drei oben beschriebenen Bauweisen (Stahlbeton-, Holzleichtbau- und Holzmassivbauweise) simuliert. In einem zweiten Schritt wurden alle Wand- und Deckenflächen mit Vorsatzschalen versehen. Für die Wände wurden typische Vorsatzschalen für Installationen gewählt, für die Stahlbetondecken wurde eine abgehängte Decke verwendet (bei der Holzleichtbau- und Holzmassivbauweise sind abgehängte Decken als Schallschutzgründen bereits im Standardaufbau enthalten) und am Fußboden wurde ein Distanzboden eingezogen (Abbildung 57; Abbildung 58; Abbildung 59).

AW_MV IW_MV GD_MV

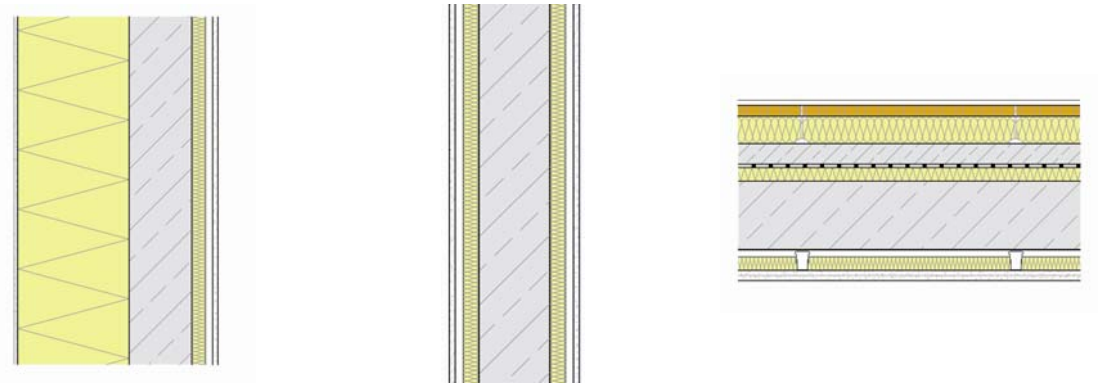

Abbildung 57: Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschalen – Außenwand, Innenwand und Geschoßdecke. Anmerkung: Bei den Wänden ist die raumzugewandte Seite rechts (e.A. nach Waltjen et al. 2008). AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale

AW_LV IW_LV GD_LV

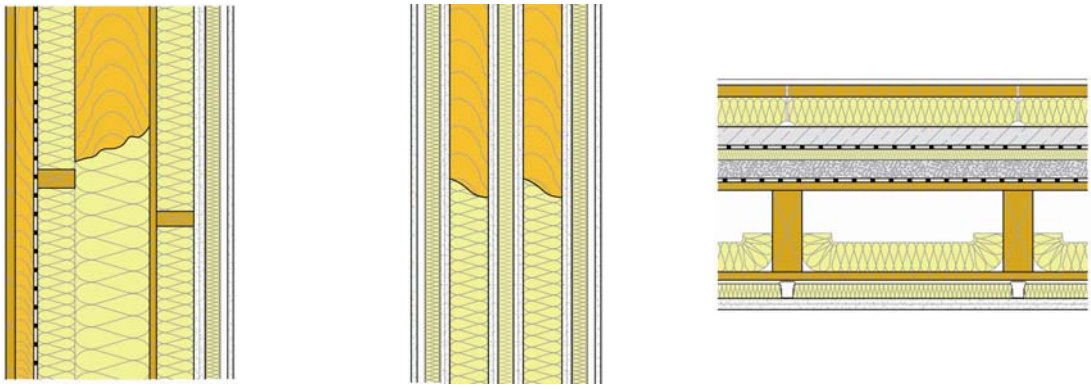

Abbildung 58: Holzleichtbauweise mit Vorsatzschalen – Außenwand, Innenwand und Geschoßdecke. Anmerkung: Bei den Wänden ist die raumzugewandte Seite rechts (e.A. nach Waltjen et al. 2008).
AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale

AW_HV IW_HV GD_HV

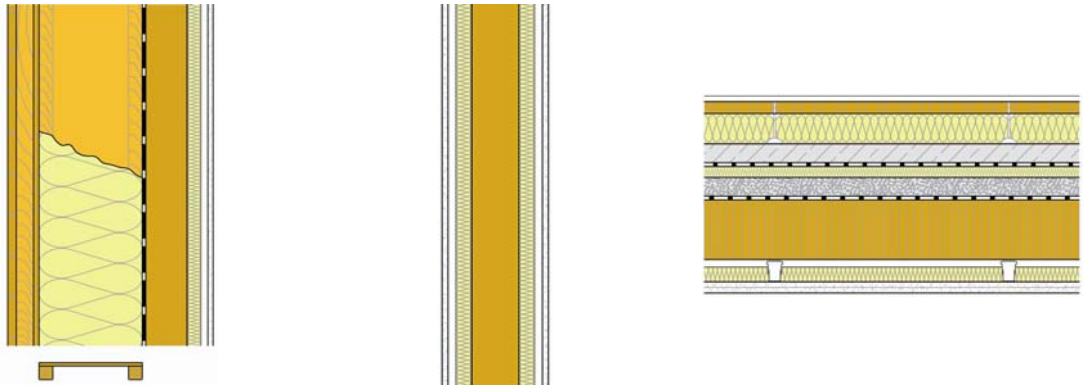

Abbildung 59: Holzmassivbauweise mit Vorsatzschalen – Außenwand, Innenwand und Geschoßdecke. Anmerkung: Bei den Wänden ist die raumzugewandte Seite rechts (e.A. nach Waltjen et al. 2008).
AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale

Die Vorsatzschale für die Wand und die Decke, die Installationsebene und die abgehängte Decke werden den Flächen vorgesetzt. Der Distanzboden wird im Schichtaufbau zwischen das Parkett und dem Estrich eingefügt (Tabelle 20).

Tabelle 20: Vorsatzschalen – Schichtaufbau (Waltjen et al. 2008)
Aufbau der Wände von innen nach außen, bei der Geschoßdecke von oben nach unten.

Bauteil-bezeichnung	Position	Dicke [cm]	Schichtbezeichnung
Installations-ebene Wand	1	1,5	Gipskartonplatte
	2	2	Luft
	3	4	Mineralwolle
Distanzboden	2	3,2	Spanplatte, Nut + Feder
	3	8	Mineralwolle zw. höhenjustierbaren, trittschalldämmenden Distanzfüßen
Abgehängte Decke	n+1	1	Luftspalt
	n+2	4	Mineralwolle
	n+3	3	2 Lg. Gipskarton-Brandschutzplatten auf Schwingbügel

5.3.3 Nomenklatur der Bezeichnungen

Im Folgenden wird in vier Computersimulationen die Innenraumtemperatur von unterschiedlichen Variablen beeinflusst. Die verwendeten Bezeichnungen folgen einer Nomenklatur, die in Tabelle 21 aufgeschlüsselt ist.

Tabelle 21: Erläuterung der Abkürzungsbezeichnungen

Ti	operative Innentemperatur
Ta	Außentemperatur
_M	Stahlbetonbauweise
_L	Holzleichtbauweise
_H	Holzmassivbauweise
_MV	Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschalen
_LV	Holzleichtbauweise mit Vorsatzschalen
_HV	Holzmassivbauweise mit Vorsatzschalen
(oV)	ohne Verschattungseinrichtung
(I)	Innenverschattung
(A)	Außenverschattung
(V)	Vorsprung
EZ	Eingeschwungener Zustand
fc	Verschattungsfaktor
T	Tag: 8:00-18:00 Uhr
N	Nacht: 18:00-8:00 Uhr

Beispiele dafür wären:

Ti_MV (V) Innenraumtemperatur, Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschalen, Raum verschattet mit einem Vorsprung.

Ti_H (oV) T=0,5 N=5 Innenraumtemperatur, Holzmassivbauweise, Raum ohne Verschattungseinrichtung. Die Luftwechselrate beträgt von 8:00 bis 18:00 0,5 h^{-1} und von 18:00 bis 8:00 5 h^{-1}.

5.3.4 Verschattungsvarianten

In den Simulationen wurden drei verschiedene Verschattungsarten verwendet.

1. Innenmarkise: Laut ÖNORM B 8110-3 sind Innerverschattungen mit einen Abminderungsfaktor z von 0,75 in Rechnung zu stellen. Der Verschattungsfaktor f_c errechnet sich aus 1 - z = 1 – 0,75 = 0,25 d.h. nur 25 % der an der Innenseite des Fensters ankommenden Solarstrahlung werden reflektiert bzw. absorbiert, die restlichen 75 % der Energie passieren ungehindert die Innenmarkise.
2. Außenjalousie: Laut ÖNORM B 8110-3 sind Außenjalousien mit einem Abminderungsfaktor z von 0,27 in Rechnung zu stellen. Der Verschattungsfaktor f_c errechnet sich analog zu dem der Innenmarkise aus 1 – z = 1 – 0,27 = 0,73 d.h. 73 % der auf der Außenseite der der Außenjalousie auftreffende Solarstrahlung wird reflektiert bzw. absorbiert, nur 27 % der Energie gelangen an die Fensteraußenseite.
3. Vorsprung: An der Südseite wurde über dem Fenster ein Vorsprung angebracht; die Abmessungen sind der Abbildung 60 zu entnehmen. Der Vorsprung kragt um 1,5 m aus und ist 1,5 m über der Fensterunterkante angebracht. Hier gibt es keinen Verschattungsfaktor, die Software errechnet die Verschattung des Fensters dynamisch.

In den Simulationen mit Verschattungsvarianten wurden zwecks Vereinfachung des Modells von einer 24 Stunden am Tag aktiven Verschattung ausgegangen, d.h. die Innenmarkisen und Außenjalousien sind rund um die Uhr geschlossen.

Die Geometrie des Vorsprungs wurde primär nach den Gesichtspunkten einer optimalen Verschattung der Fensterfläche ausgewählt.

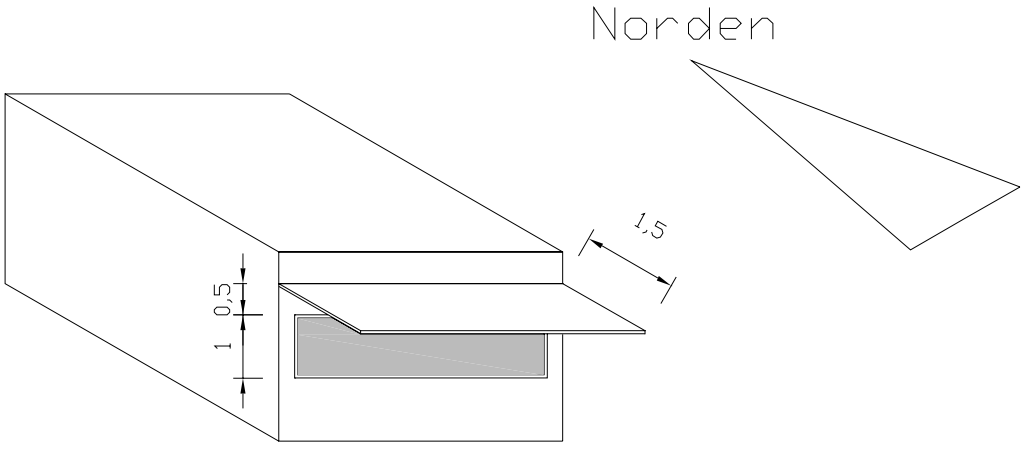

Abbildung 60: Verschattung mit Vorsprung (Angaben in [m]) (e.A.)

5.3.5 Übersicht über die Simulationen

Tabelle 22 zeigt in einer Übersicht, mit welchen Varianten in den Simulationsmodellen gerechnet wird.

Tabelle 22: Übersicht über die Simulationen

Simulation Nr.	Verschattungsart				Ventilation		Seite
	keine	Innen	Außen	Vorsprung	kontinuierlich	tageszeit-gesteuert	
1	X						91
2	X	X	X	X			94
3	X				X		102
4	X					X	109

5.3.6 Auswertungen der Simulationen

Für alle vier Simulationsmodelle wird zum einen der Verlauf der **Innenraumtemperatur über 14 Tage** (Ausgangspunkt der Analyse ist 20 °C und 40 % relative Feuchte) und zum anderen **der eingeschwungene Temperaturzustand** analysiert. Zu diesem Zweck wurde über die ganze Dauer des eingeschwungenen Sommerzustandes (67 Tage) nach ÖNORM B 8110-3 simuliert. Wurde innerhalb dieser 67 Tage mit dem Ausgangspunkt 20 °C kein eingeschwungener Temperaturzustand erreicht (Regressionsgerade über die Temperaturmittelwerte weißt eine Steigung auf), wurde in einem zweiten Schritt die Endtemperatur der ersten Simulation als Ausgangstemperatur für die zweite Simulation gewählt. Damit wurden innerhalb der 67 Tage auch für den temperaturträgen Stahlbetonbau eingeschwungene Zustände erreicht.

Für beide Auswertungen wurden die operativen Innenraumtemperaturen in Zeitschritten von 30 min mit der Simulationssoftware TRNSYS berechnet. Für die Ausgabe wurden die Mittelwerte über eine Stunde herangezogen. Die Ergebnisse werden in der Form einer Textdatei erstellt. Diese wurde in die Software Excel importiert und für die Analyse der Innenraumtemperatur über die ersten 14 Tage mittels des Diagramm-Assistenten als Linien Diagramme dargestellt.

Die numerische Auswertung des eingeschwungenen Temperaturzustandes erfolgte ebenfalls mit Excel (Anhang A3 Numerische Ergebnisse der statistischen Auswertung (Boxplots)). Für die grafische Darstellung der Ergebnisse mittels Boxplots wurde das Statistiksoftwarepacket SPSS benutzt. Für den eingeschwungenen Zustand wurden nur die letzten 3 Tage der untersuchten 67 Tage ausgewertet.

5.3.7 Simulationsmodell 1 – ohne Verschattung und ohne Ventilation

Im ersten Simulationsmodell wird der Raum ohne Verschattung und Ventilation den sommerlichen Temperaturen und solaren Einstrahlungen ausgesetzt.

5.3.7.1 Analyse der Innenraumtemperatur über 14 Tage

Die Simulation wurde sowohl in der Variante mit als auch ohne Vorsatzschalen gerechnet.

a) ohne Vorsatzschalen

Wie im Ergebnis der Simulation deutlich zu erkennen ist, kommt es bei der Stahlbetonbauweise durch die hohe Wärmespeicherfähigkeit zu den geringsten Erwärmungen und beim Holzleichtbau zu den größten Erwärmungen. Die Temperaturschwankungen der 24-Stunden-Periode verhalten sich analog dazu. Der Holzmassivbau nimmt eine Stellung zwischen den beiden Extremen ein. (Abbildung 61).

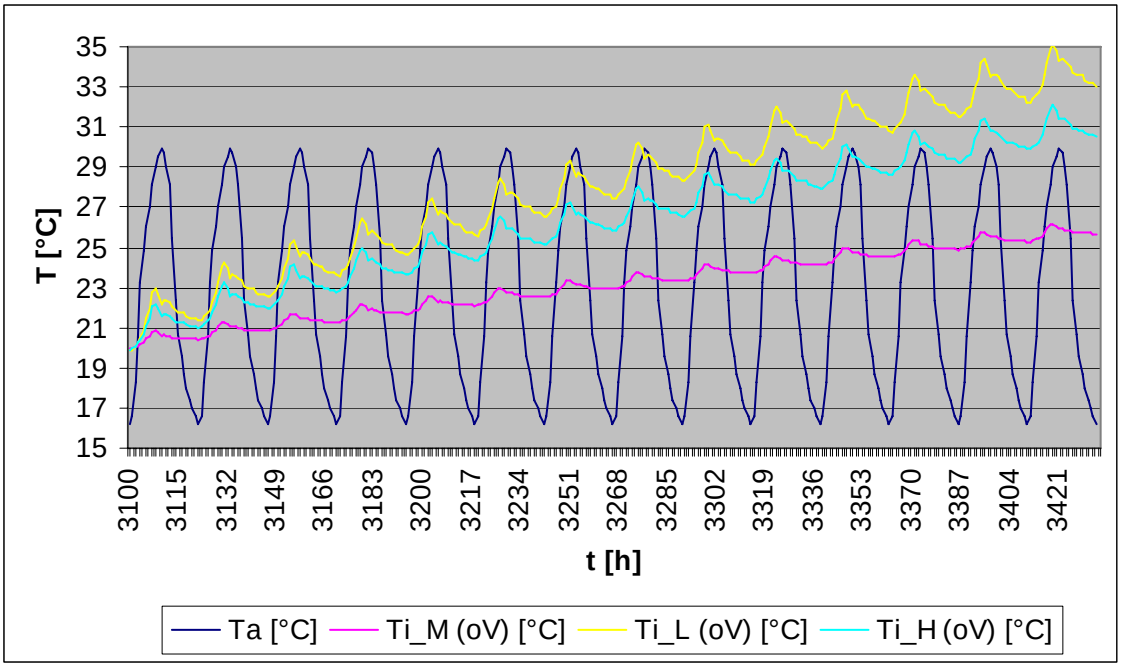

Abbildung 61: Stahlbeton-, Leichtbau- und Massivholzbau ohne Verschattung und ohne Ventilation (e.A.).
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _M = Stahlbetonbauweise, _L = Holzleichtbauweise, _H = Holzmassivbauweise, (oV) = ohne Verschattung

b) mit Vorsatzschalen

Bei einem Aufbau mit Vorsatzschalen ergibt sich ein ähnliches Ergebnis: Der Holzleichtbau erreicht wieder die höchsten Temperaturen, der Stahlbetonmassivbau erfährt die geringste Erwärmung, der Massivholzbau nimmt eine Mittelstellung ein.

Es wird ersichtlich, dass die Tagestemperaturamplituden aller Aufbauten durch die Vorsatzschalen ungefähr gleich groß sind. Die Vorsatzschalen bilden durch ihren Aufbau einen hohen Wärmewiderstand, womit das Wärmespeichervermögen der Wand in den Tageszyklen stark reduziert ist. Bemerkenswert ist, dass der Mittelwert der Temperatur am Ende der Simulation nur geringfügig höher liegt als bei den Aufbauten ohne die Vorsatzschalen. Dies lässt darauf schließen, dass die Vorsatzschalen über kurze Perioden (24 Stunden) einen hohen Wärmewiderstand gegenüber der eindringenden Wärmewelle in den Raum bilden, aber über eine Periode von 14 Tagen betrachtet die eingebrachte Wärme sehr wohl in die Flächen hinter den Vorsatzschalen eindringen und bei entsprechenden Eigenschaften des Baustoffes gespeichert werden kann (Abbildung 62).

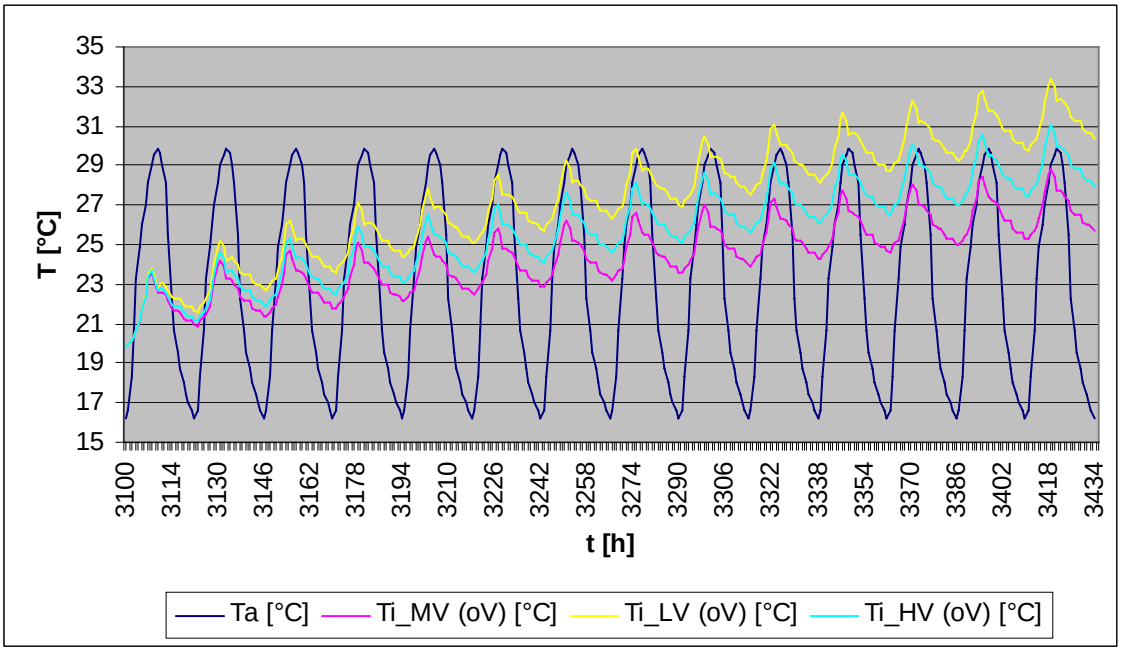

Abbildung 62: Stahlbeton-, Leichtbau- und Massivholzbau mit Vorsatzschalen; ohne Verschattung und ohne Ventilation (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale, _LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale, _HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung

5.3.7.2 Analyse des eingeschwungenen Temperaturzustandes

In der Abbildung 63 sind die Ergebnisse der eingeschwungenen Innenraumtemperaturen in Form von Boxplots grafisch dargestellt. Es wird deutlich, dass bei Raummodellen mit Vorsatzschalen die Temperaturamplituden wesentlich größer sind als bei den Raummodellen ohne Vorsatzschalen.

Betrachtet man nur die Raummodelle ohne Vorsatzschalen, so ist sichtbar, wie bereits in den vorherigen Abbildungen zu erkennen war, dass die Temperaturamplitude bei dem Holzleichtbau am größten und den Stahlbetonbau am geringsten ist.

Unabhängig von den Bauweisen ist bei allen Raummodellen mit Vorsatzschalen die Temperaturschwankung nahezu gleich groß; abhängig von der Bauweise stellt sich ein Temperaturmittelwert ein.

Die Temperaturmittelwerte unterscheiden sich nur wenig, sowohl bei den Raummodellen mit als auch ohne Vorsatzschalen, da die Speichermassen die aufgenommene Wärmeenergien nicht wieder abgeben können.

Die Mediane der Raummodelle mit Vorsatzschalen liegen auf einem höheren Niveau verglichen mit Raummodellen ohne Vorsatzschalen. Die Vorsatzschalen bilden eine zusätzliche Wärmedämmung, womit der U-Wert sinkt, was bedeutet, dass die Wärmetransmission in der Nacht durch die Außenwand erschwert wird und sich damit eine höhere Temperatur im eingeschwungenen Zustand einstellt.

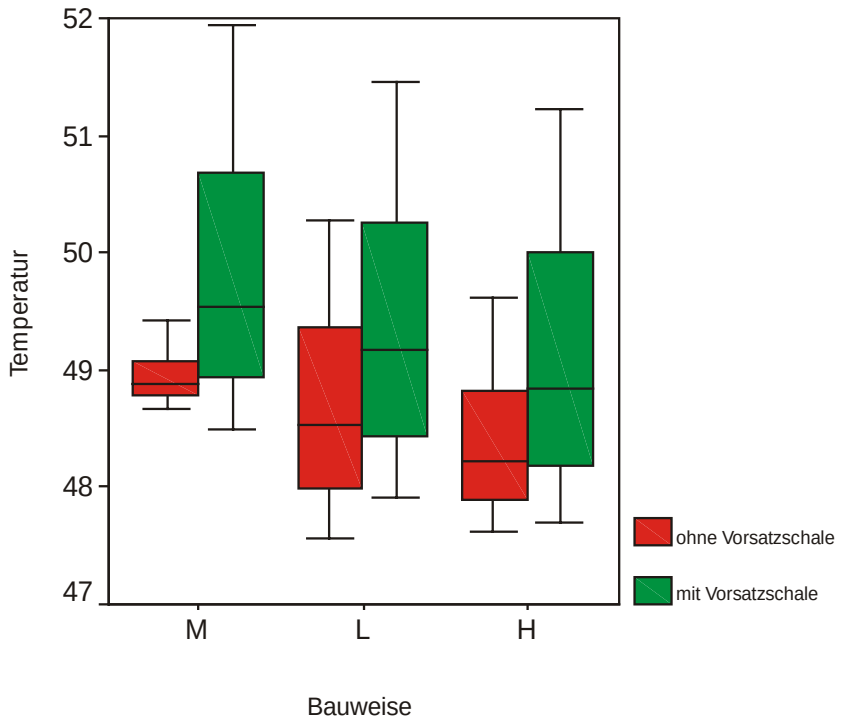

Abbildung 63: Eingeschwungener Zustand, Temperatur, ohne Verschattung, ohne Ventilation (e.A.)
M = Stahlbetonbauweise, L = Holzleichtbauweise, H = Holzmassivbauweise

5.3.8 Simulationsmodell 2 – mit Verschattungen und ohne Ventilation

In der Simulation Nummer zwei werden die Auswirkungen von Verschattungen in Kombination mit den verschiedenen Wandaufbauten untersucht. Wie in Simulationsmodell 1 gibt es auch hier keine Ventilation der Räume.

5.3.8.1 Analyse der Innenraumtemperatur über 14 Tage

Die Simulation wurde sowohl in der Variante mit als auch ohne Vorsatzschalen gerechnet.

a) ohne Vorsatzschalen

Wie schon im ersten Simulationsmodell ist auch hier bei den drei untersuchten Aufbauten der raumumgebenden Flächen deutlich der Einfluss des Wärmespeichervermögens aufgefallen.

Die Verschattung mit der Innenmarkise bietet nahezu keinen Schutz gegen Überwärmung. Der Verlauf der operativen Temperatur im Innenraum ist nahezu unverändert im Vergleich zum Raummodell ohne Verschattung.

Eine deutliche Reduktion der Temperatur bringt der Vorsprung, welcher die Fensterfläche verschattet. Das beste Ergebnis zeigt in der Simulation die Außenverschattung (Abbildung 64, Abbildung 65, Abbildung 66).

An dieser Stelle wird nochmals darauf hingewiesen, dass für die Innenverschattung ein wesentlich geringerer Verschattungsfaktor mit 0,25 als für die Außenverschattung mit 0,73 laut ÖNORM 8110-3 angenommen wurde.

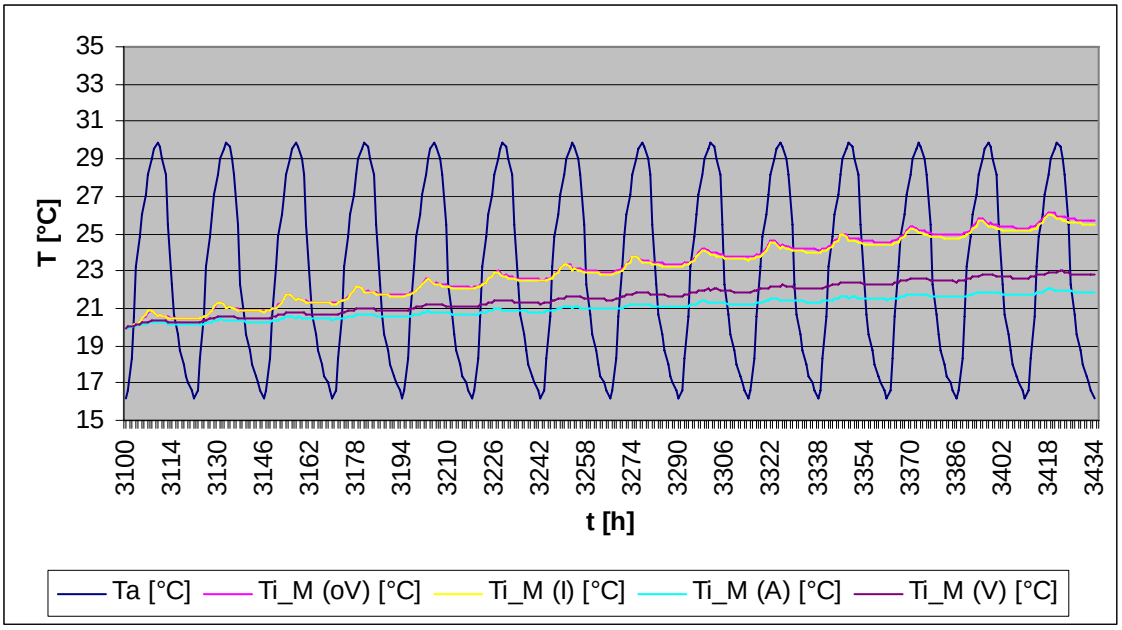

Abbildung 64: Stahlbetonbau mit unterschiedlichen Verschattungsvarianten (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _M = Stahlbetonbauweise, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, (V) = Vorsprung

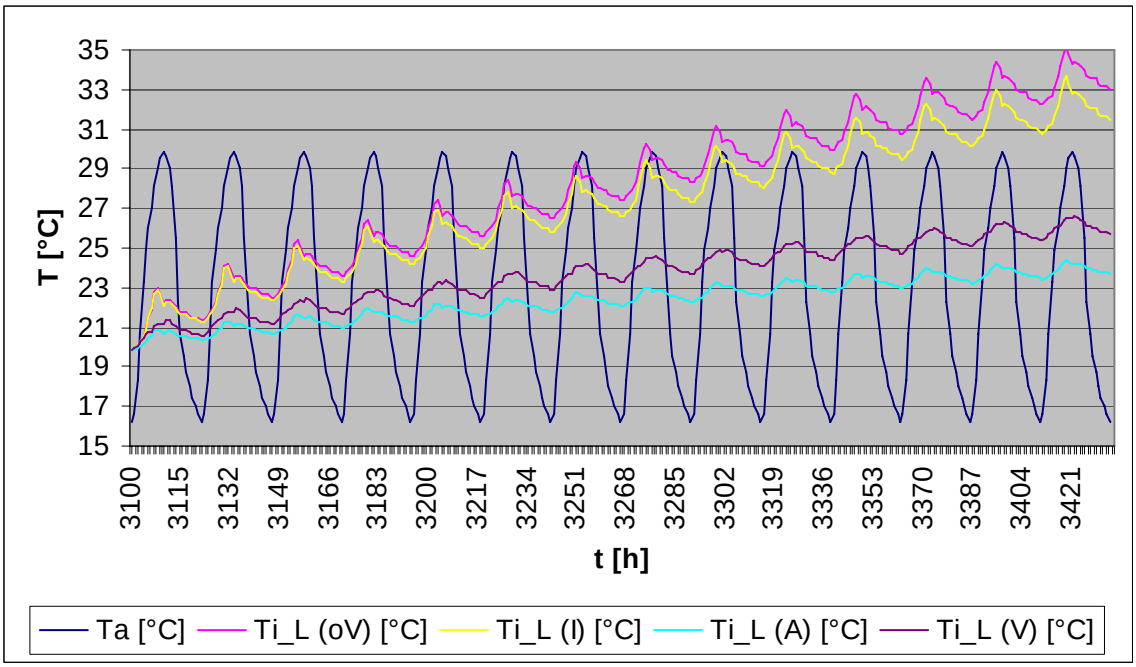

Abbildung 65: Holzleichtbau mit unterschiedlichen Verschattungsvarianten (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _L = Holzleichtbauweise, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, (V) = Vorsprung

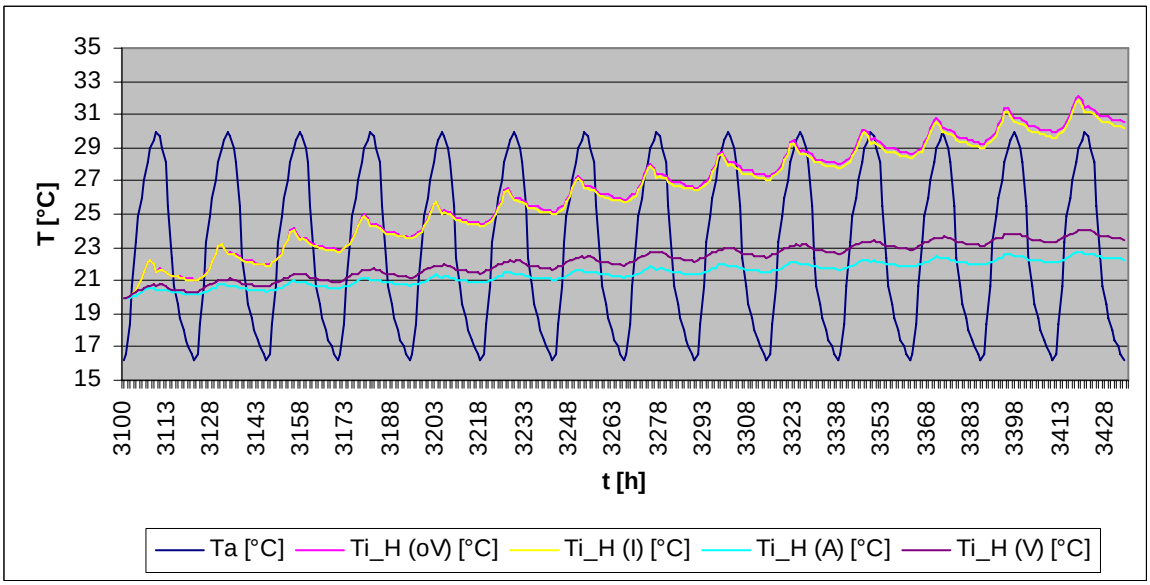

Abbildung 66: Holzmassivbau mit unterschiedlichen Verschattungsvarianten (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _H = Holzmassivbauweise, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, (V) = Vorsprung

b) mit Vorsatzschalen

Die Vorsatzschalen verursachen wie schon im ersten Simulationsmodell beschrieben eine erhöhte Temperaturamplitude innerhalb der 24-Stunden-Periode.

Dies ist besonders beim Temperaturverlauf mit Innenverschattung bzw. im Temperaturverlauf ohne Verschattung zu sehen. Bei der Verschattungsvariante mit dem Vorsprung ist dieser Effekt schon deutlich geringer; bei der Außenjalousie fast gar nicht mehr erkennbar. Daraus kann man schließen, dass bei Verschattungen, die die Einstrahlung schon an der Außenseite des Gebäudes absorbieren und reflektieren, der Einfluss der Speicherfähigkeit einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Raumtemperatur ausübt als bei unverschatteten bzw. mit Innenverschattung ausgestatteten Gebäuden (Abbildung 67; Abbildung 68; Abbildung 69).

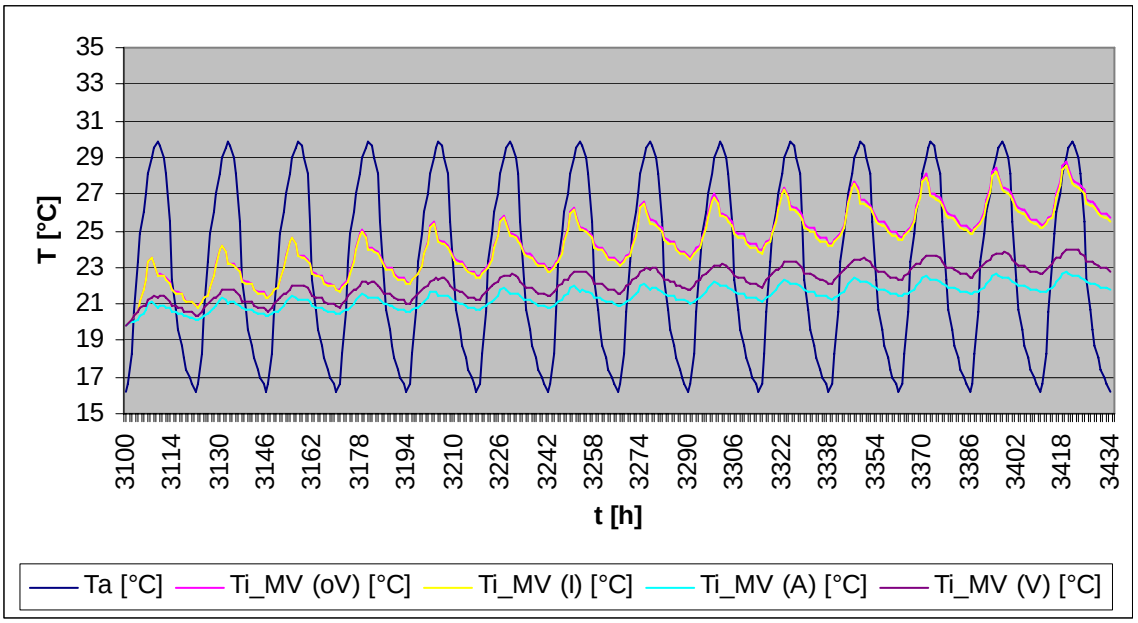

Abbildung 67: Stahlbetonbau mit Vorsatzschalen und unterschiedlichen Verschattungsvarianten (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, (V) = Vorsprung

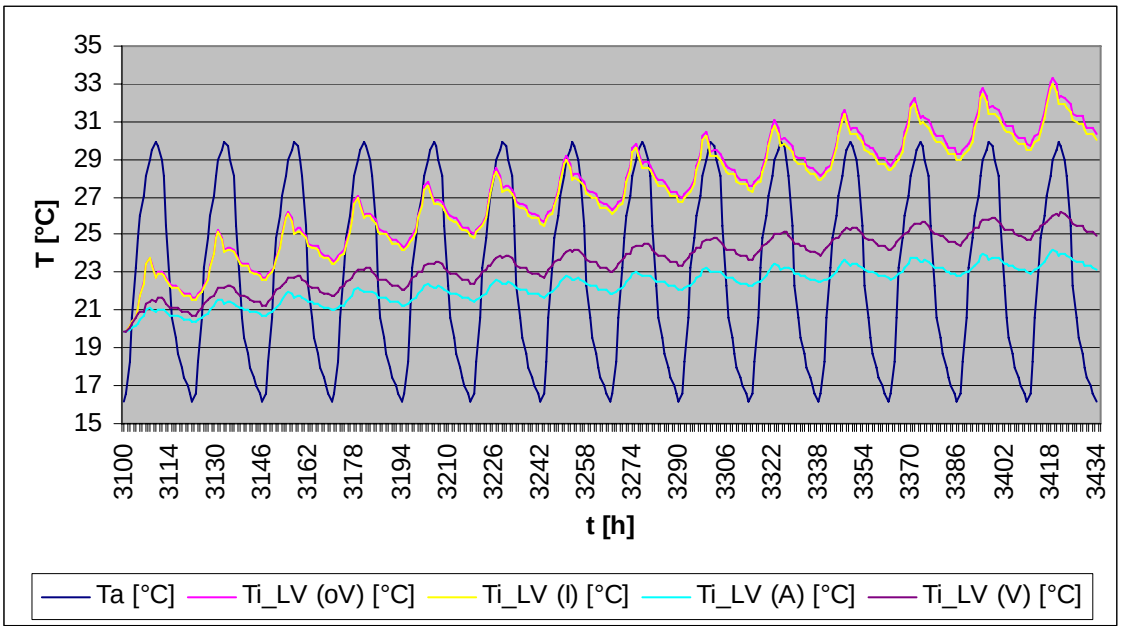

Abbildung 68: Holzleichtbau mit Vorsatzschalen und unterschiedlichen Verschattungsvarianten (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, (V) = Vorsprung

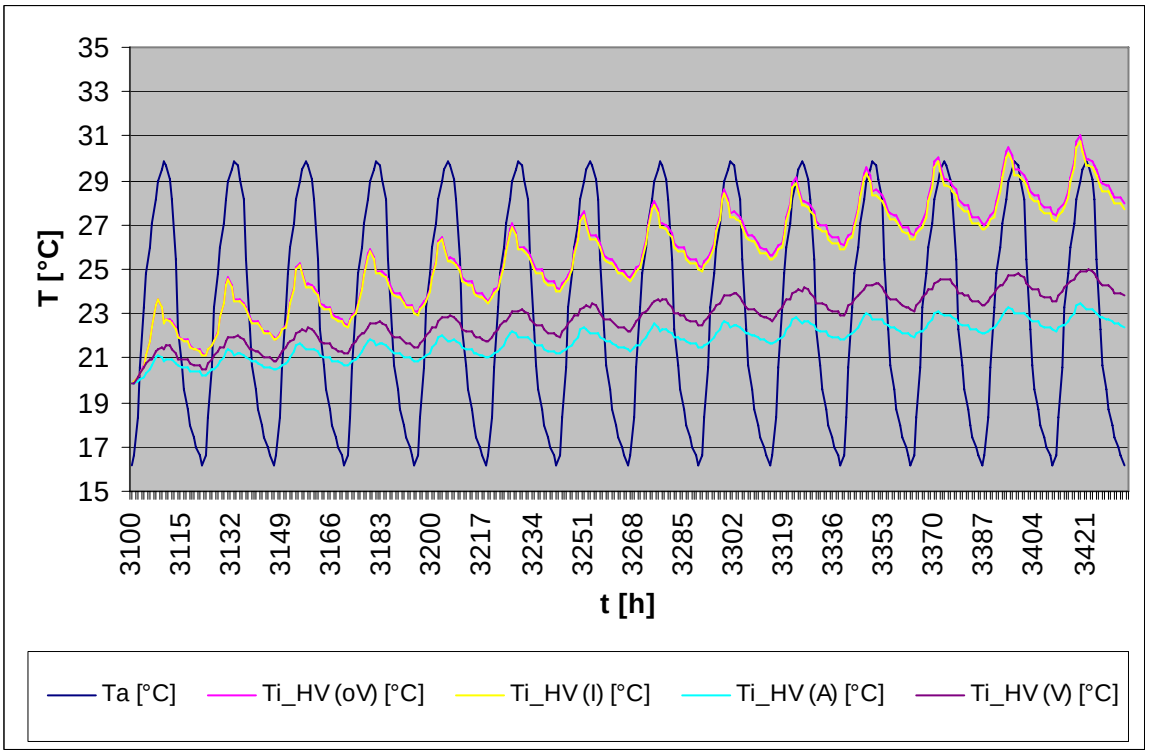

Abbildung 69: Holzmassivbau mit Vorsatzschalen und unterschiedlichen Verschattungsvarianten (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, (V) = Vorsprung

5.3.8.2 Analyse des eingeschwungenen Temperaturzustandes

Vergleicht man Abbildung 63 mit Abbildung 70 kann man erkennen, dass im eingeschwungenen Zustand genauso wie in der Temperaturanalyse über 14 Tage nahezu kein Unterschied (ca. 1 °C) zwischen der Verschattung mit Innenmarkisen und der Variante ohne Verschattung zu sehen ist.

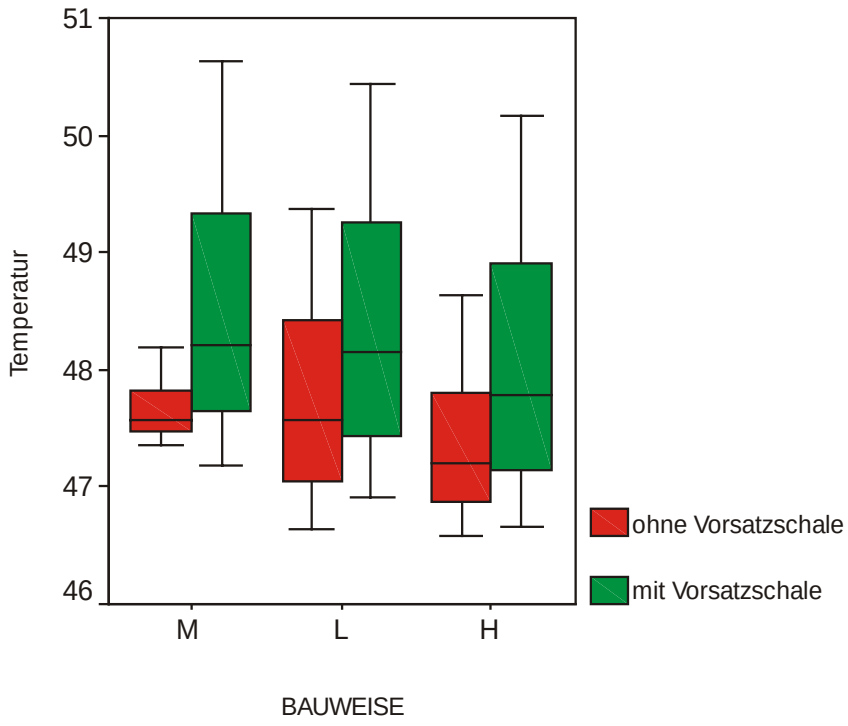

Abbildung 70: Eingeschwungener Zustand, Temperatur mit Innenverschattung, ohne Ventilation (e.A.)
M = Stahlbetonbauweise, L = Holzleichtbauweise, H = Holzmassivbauweise

Bei der Verschattungsvariante mit Außenjalousien zeigt sich erstaunlicherweise, dass nahezu unabhängig von der Bauweise und der Vorsatzschale die Temperaturmittelwerte und -verteilungen identisch sind, da die Außenverschattung den größten Teil der Wärmeenergie (73 %) abblockt.

Die restliche Wärmemenge, welche das Fenster passiert, ist so gering, dass es selbst beim Holzleichtbau verglichen zum Stahlbetonbau nur zu einer minimalen Temperaturerhöhung kommt.

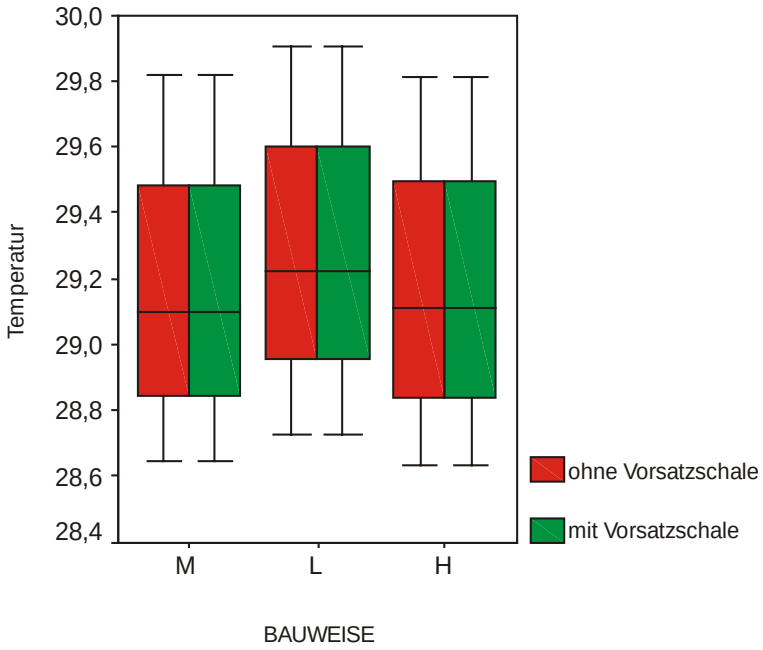

Abbildung 71: Eingeschwungener Zustand, Temperatur mit Außenverschattung, ohne Ventilation (e.A.)
M = Stahlbetonbauweise, L = Holzleichtbauweise, H = Holzmassivbauweise

Bei der Verschattung mit Vorsprung wirken sich die speicherwirksamen Massen und vor allem die Vorsatzschalen deutlich auf die mittlere Raumtemperatur bzw. die Temperaturamplitude aus (Abbildung 72).

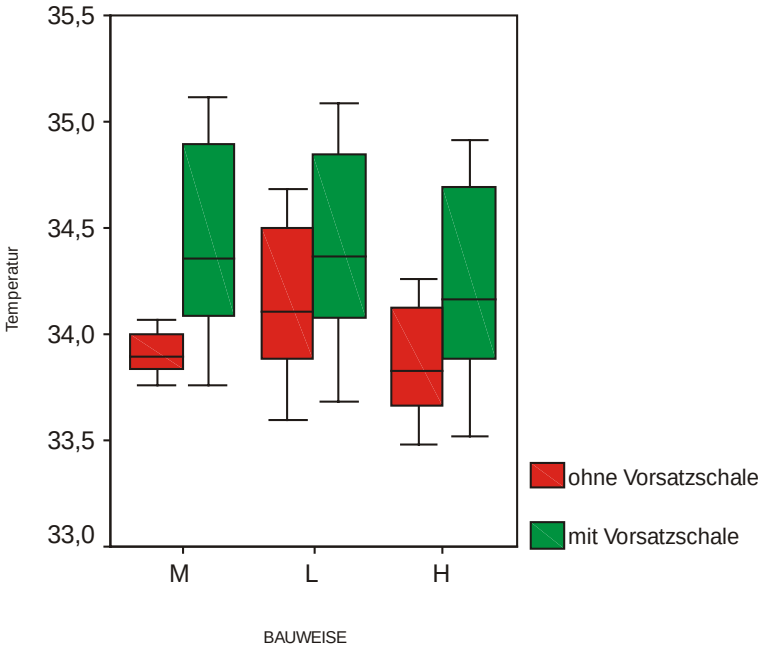

Abbildung 72: Eingeschwungener Zustand, Temperatur mit Verschattung durch Vorsprung, ohne Ventilation (e.A.)
M = Stahlbetonbauweise, L = Holzleichtbauweise, H = Holzmassivbauweise

5.3.8.3 Gegenüberstellung der Wirkung von Innen- und Außenverschattungen über 14 Tage

Da die Innenverschattung fast keinen Schutz gegen die sommerliche Überhitzung in den vorangegangen Auswertungen zeigt, wurde in diesem Simulationsbeispiel versucht, den Ursachen dafür auf den Grund zu gehen.

Zu Beginn lag die Vermutung nahe, dass der geringe Verschattungsfaktor von nur 0,25 bewirkt, dass der Temperaturverlauf mit der Innenverschattung nahezu identisch mit dem ohne Verschattung ist, beziehungsweise dass der wesentlich niedrigere Temperaturverlauf mit der Außenverschattung durch den hohen Verschattungsfaktor von 0,75 bewirkt wird.

Um die beiden vermuteten Einflussfaktoren zu eliminieren, wurden beide Verschattungsfaktoren auf 0,5 gesetzt. Wie in Abbildung 73 zu sehen ist, wurde der Raum in Massivholzbauweise für den Versuch gewählt, da dieser eine Mittelstellung in der Wärmespeicherfähigkeit zwischen den Extremata von Stahlbetonbauweise und Holzleichtbauweise darstellt.

Wieder verläuft die Innenraumtemperaturkurve der unverschatteten Variante nahezu gleich wie die Kurve der Innenverschattung (trotz Verschattungsfaktor von 0,5). Die Temperaturkurve der Außenverschattung liegt wieder deutlich darunter.

Dieses Ergebnis bestätigt die Vermutung, dass eine Innenverschattung im Vergleich zu einer Außenverschattung bei gleichen Transmissionswerten (wobei der hier angenommene Verschattungsfaktor von 0,5 für die Innenverschattung als fiktiver Wert zu betrachten sind) fast keinen Schutz gegen sommerliche Überhitzung bietet, da die kurzwellige Sonnenstrahlung erst im Inneren des Gebäudes durch Absorption in langwellige Infrarotstrahlung umgewandelt wird und zum anderen durch Reflexion das Gebäude auch nur zu einem geringen Teil verlassen kann.

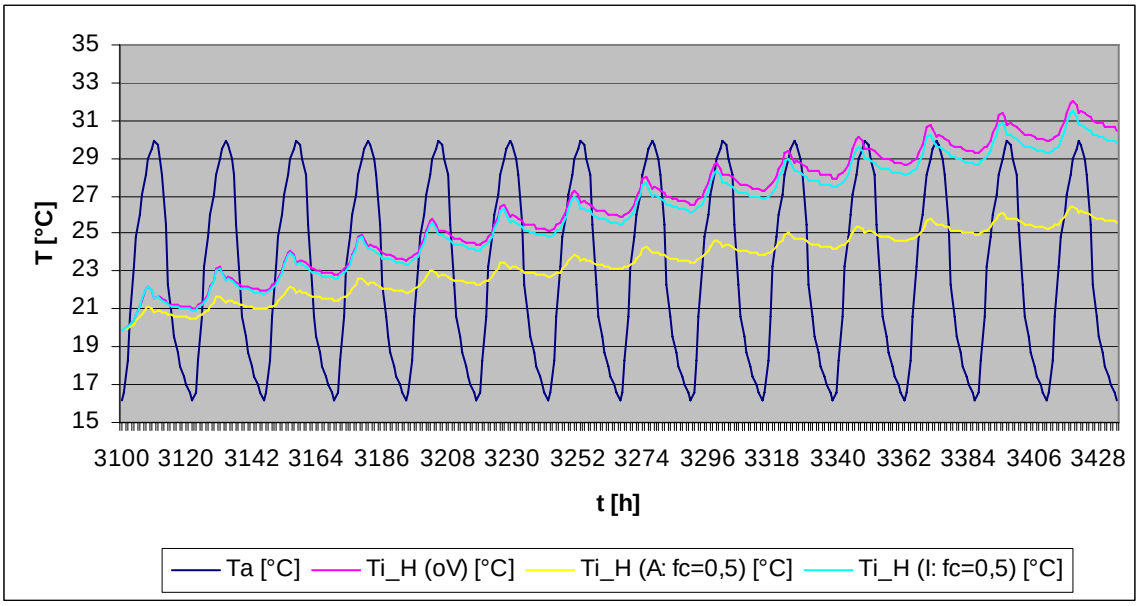

Abbildung 73: Innen- und Außenjalousie, beide mit einem Verschattungsfaktor (f_c) von 0,5 (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _H = Holzmassivbauweise, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, fc = Verschattungsfaktor

5.3.9 Simulationsmodell 3 – mit kontinuierlicher Ventilation ohne Verschattung

In diesem Simulationsmodell soll der Einfluss auf die Raumtemperatur einer kontinuierlichen Ventilation ohne Verschattung des Raumes getestet werden.

Die Ventilation ist ununterbrochen sowohl am Tag (T) als auch in der Nacht (N), in Betrieb und fördert mit einer konstanten Luftwechselrate die Außenluft in den Innenraum (ohne Änderung der Temperatur). Verändert wurde in den Varianten nur die Luftwechselrate (0, 0,5, 1, 2 und 5 h^{-1}) pro Stunde. Ihr Einfluss auf die Temperatur im Innenraum wurde aufgezeichnet.

5.3.9.1 Analyse der Innenraumtemperatur über 14 Tage

Die Simulation wurde sowohl in der Variante mit als auch ohne Vorsatzschalen gerechnet.

a) ohne Vorsatzschalen

Durch den kontinuierlichen Luftwechsel mit der Außentemperatur kommt es in der Nacht zu einer Abkühlung des Gebäudes und am Tag zum zusätzlichen Wärmeeintrag. Dies ist vor allem in den ersten Tagen bei allen Raummodellen gut zu erkennen. Durch die kontinuierlich laufende Ventilation wird sehr schnell ein nahezu eingeschwungener Zustand erreicht, vor allem bei hohen Luftwechselraten. Der Stahlbetonbau zeigt durch sein hohes Wärmespeichervermögen wieder das trägste Temperaturverhalten, der Holzleichtbau die geringste Trägheit im Temperaturverhalten und der Holzmassivbau nimmt wiederum eine Zwischenstellung zwischen den beiden anderen Bauweisen ein (

Abbildung 74; Abbildung 75; Abbildung 76).

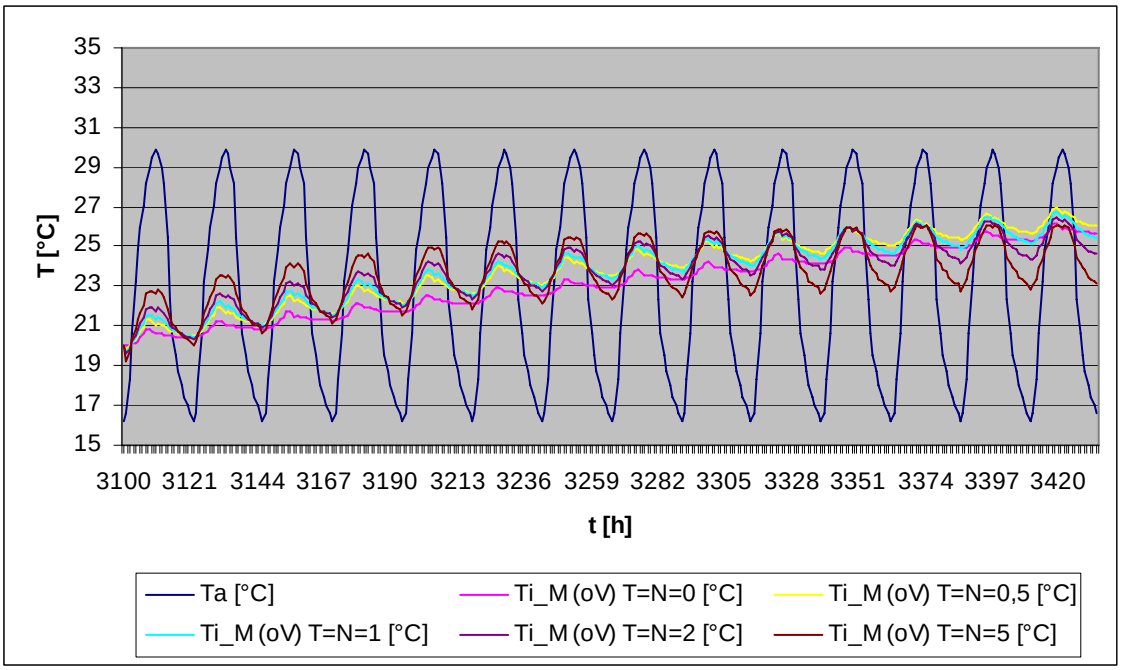

Abbildung 74: Stahlbetonbau mit kontinuierlicher Ventilation (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _M = Stahlbetonbauweise, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr,
0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1},
2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}

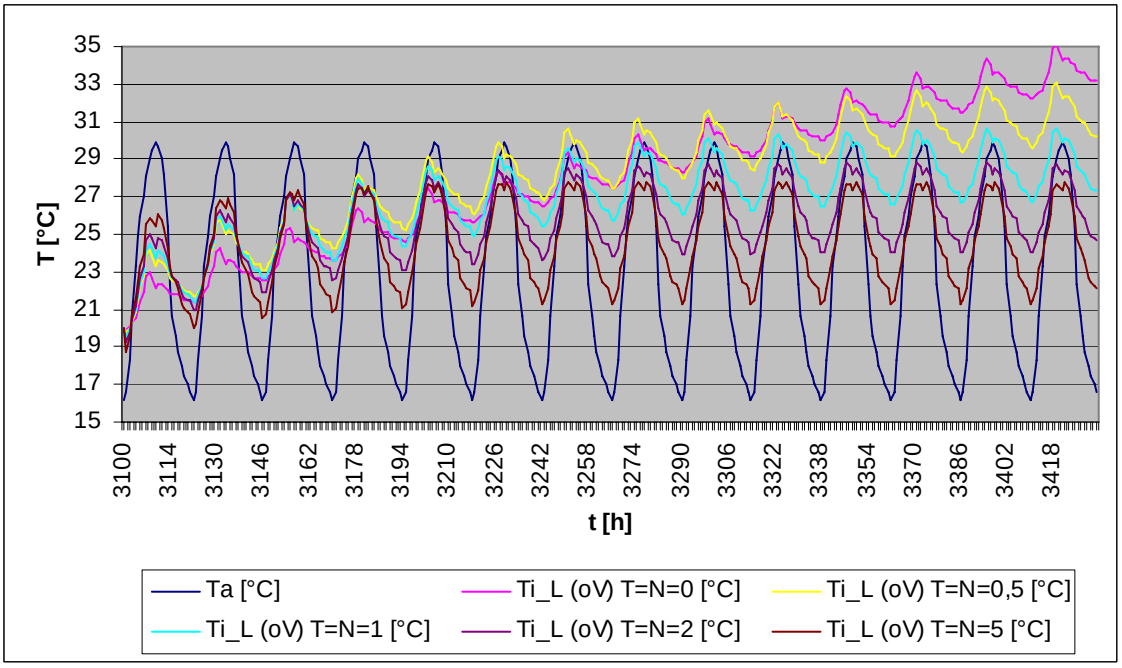

Abbildung 75: Holzleichtbau mit kontinuierlicher Ventilation (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _L = Holzleichtbauweise, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr,
0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1},
2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}

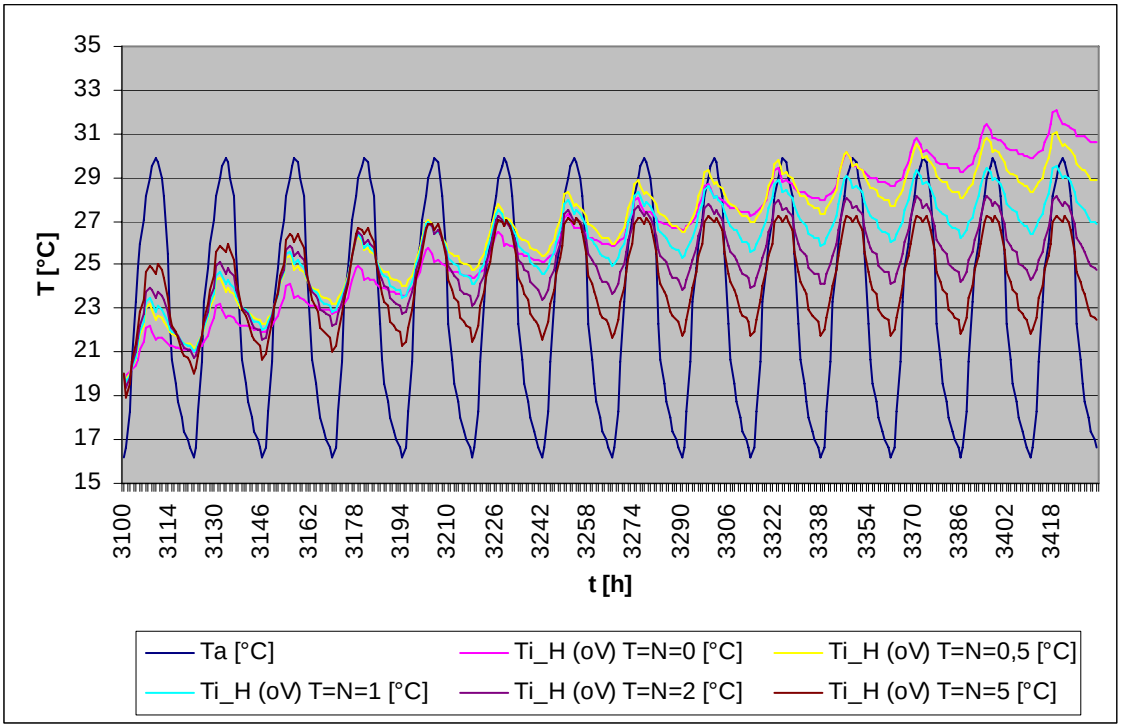

Abbildung 76: Holzmassivbau mit kontinuierlicher Ventilation (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _H = Holzmassivbauweise, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr,
0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1},
2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}

b) mit Vorsatzschalen

Bei der Variante mit den Vorsatzschalen ist das gleiche Ergebnis wie in den beiden vorhergehenden Simulationen zu erkennen. Die Temperaturschwankungen in der 24-Stunden-Periode sind höher, vor allem bei der Stahlbeton- und der Massivholzbauweise.

Während bei der Stahlbetonbauweise schon geringe Luftwechselraten (0,5 bzw. 1 h^{-1}) reichen, um die Temperatur in den 14 Tagen nahezu konstant zu halten, sind beim Holzleichtbau und Holzmassivbau höhere Luftwechselraten erforderlich, um das gleiche Ergebnis zu erzielen (Abbildung 77; Abbildung 78; Abbildung 79).

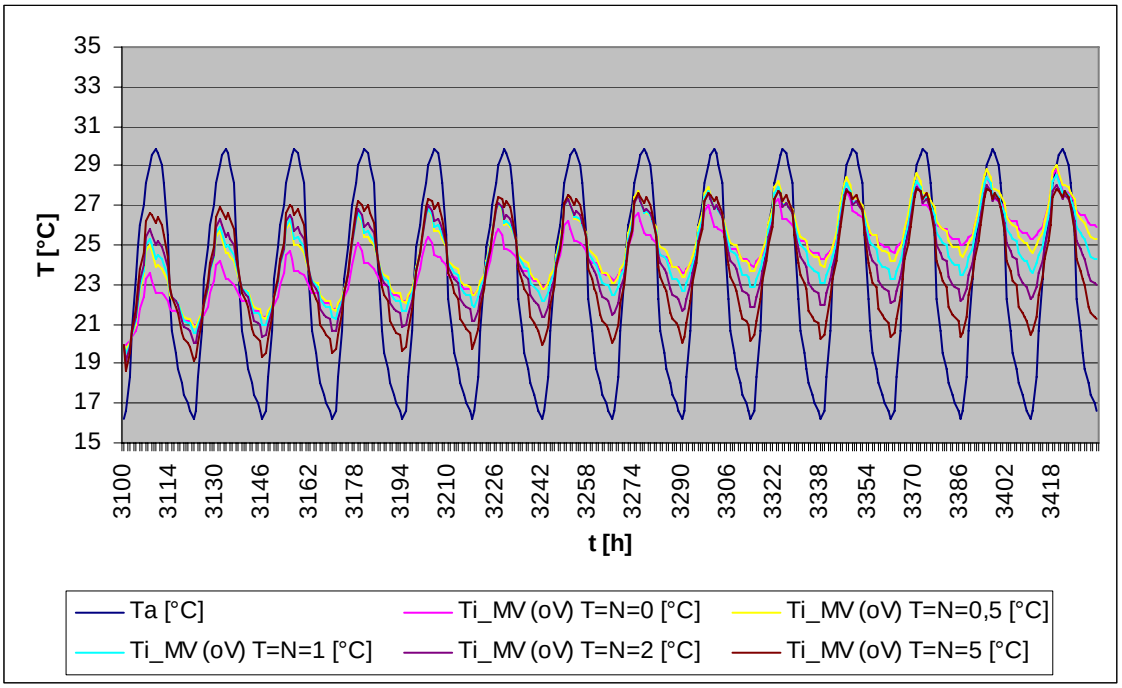

Abbildung 77: Stahlbetonbau mit Vorsatzschale und kontinuierlicher Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}

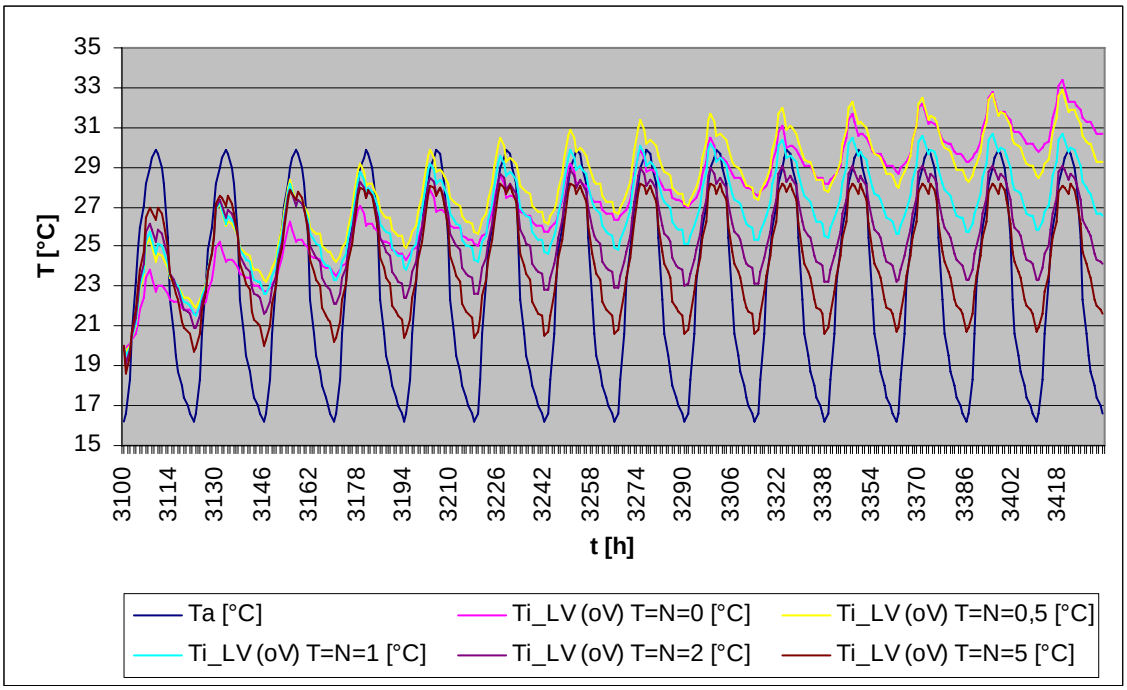

Abbildung 78: Holzleichtbau mit Vorsatzschale und kontinuierlicher Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}

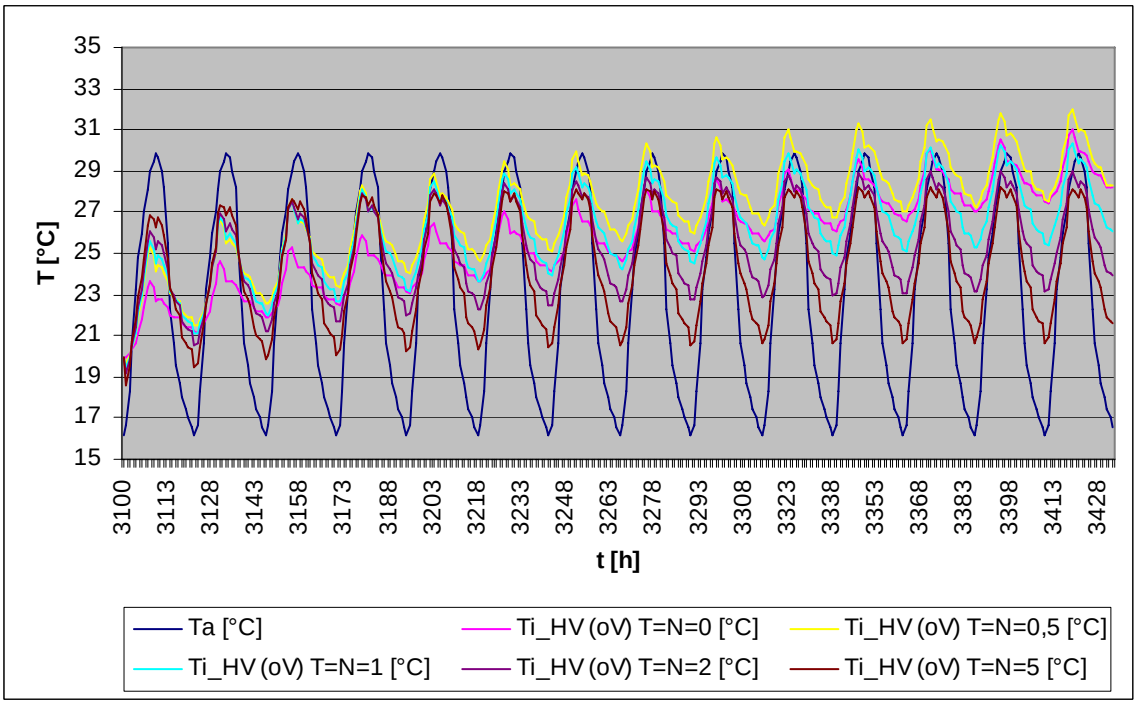

Abbildung 79: Massivholzbau mit Vorsatzschale und kontinuierlicher Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}

5.3.9.2 Analyse des eingeschwungenen Temperaturzustandes

Es zeigt sich eine deutliche Reduktion der Innenraumtemperatur bei kontinuierlicher (über 24 Stunden) Luftwechselrate von nur 0,5 h^{-1}. Je größer die Luftwechselrate wird, desto größer wird bei allen Bauweisen die Temperaturamplitude im Tagesgang. Dies lässt sich auf die kühle Luft in der Nacht und auf die warme Außenluft untertags zurückführen, die dem Raum mittels Ventilation zugeführt wird (Abbildung 80).

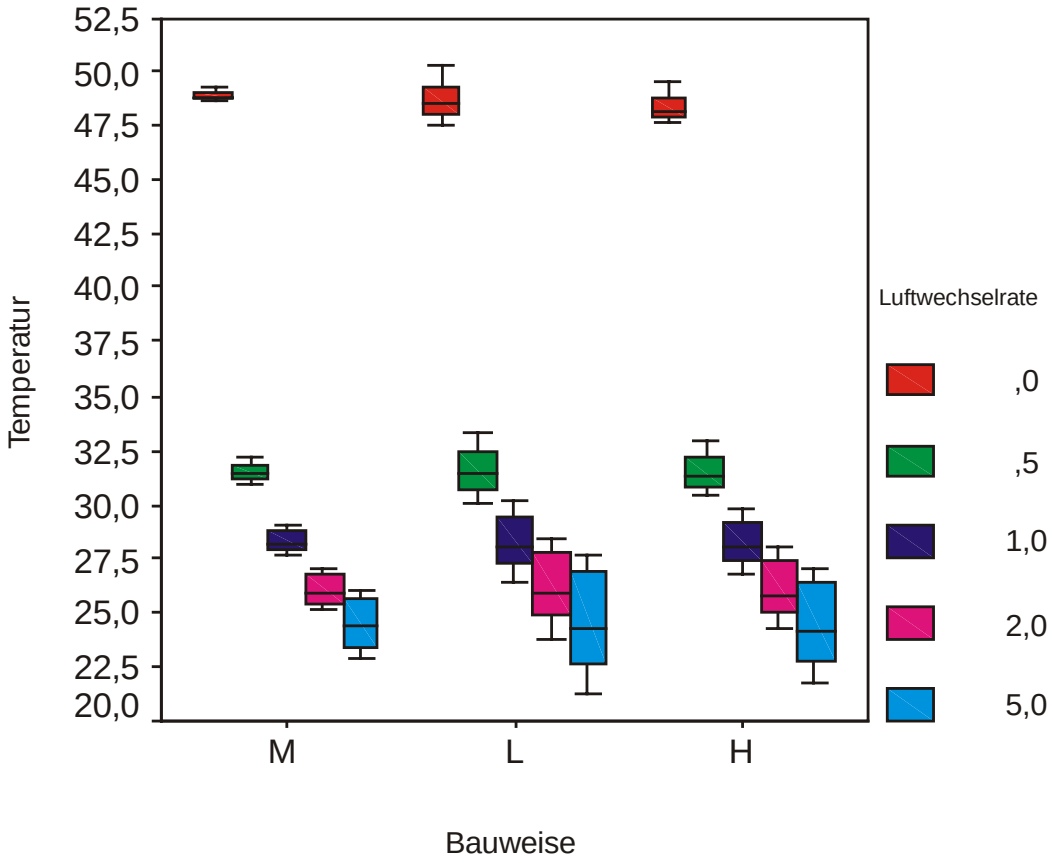

Abbildung 80: Eingeschwungener Zustand, Temperatur in Abhängigkeit der Luftwechselrate [h^{-1}] bei kontinuierlicher Ventilation, ohne Vorsatzschalen, ohne Verschattung (e.A.)
M = Stahlbetonbauweise, L = Holzleichtbauweise, H = Holzmassivbauweise

Wie in Abbildung 81 zu sehen ist, bringen die Vorsatzschalen erhöhte Temperaturamplituden im Tagesgang mit sich. Die Mittelwerte im eingeschwungenen Zustand unterscheiden sich fast nicht von den Mittelwerten der Raummodelle ohne Vorsatzschalen (Abbildung 80).

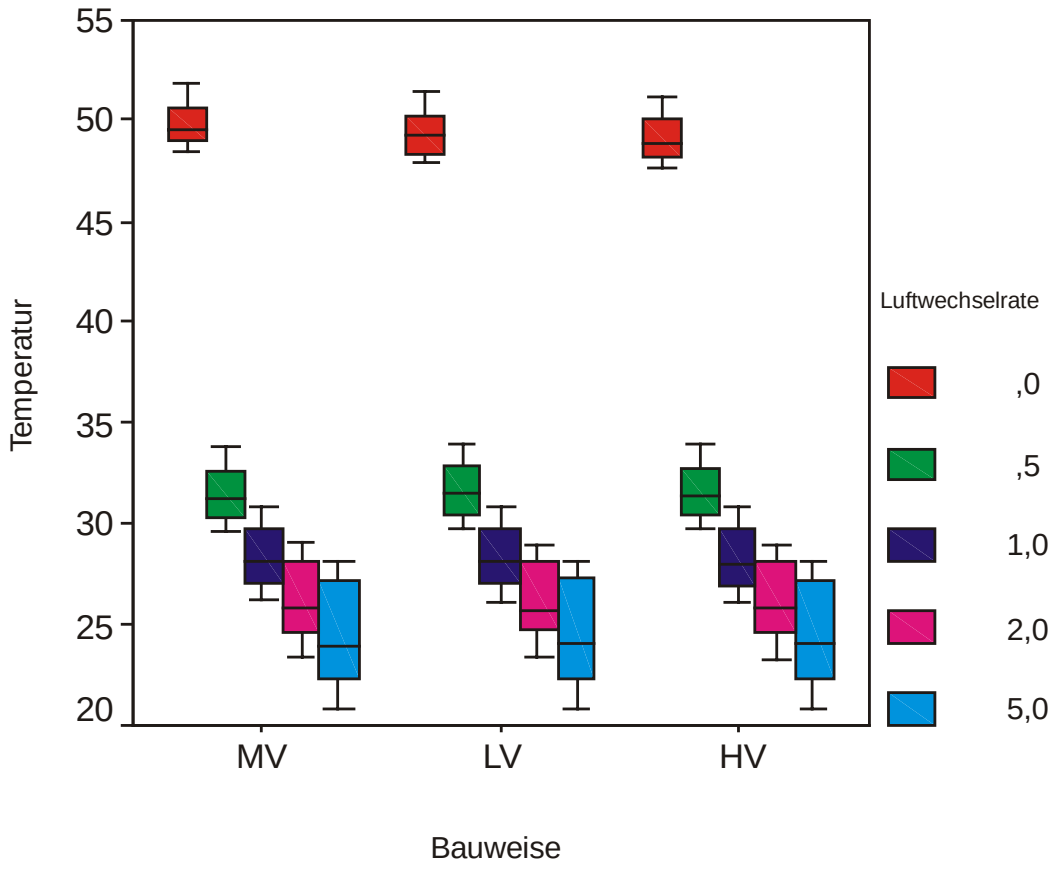

Abbildung 81: Eingeschwungener Zustand, Temperatur in Abhängigkeit der Luftwechselrate [h^{-1}] bei kontinuierlicher Ventilation, mit Vorsatzschalen, ohne Verschattung (e.A.)
MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale, LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale, HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale

5.3.10 Simulationsmodell 4 – mit tageszeitgesteuerter Ventilation, ohne Verschattung

Im vierten Simulationsmodell wurde die Ventilation optimiert. Die Luftwechselrate beträgt tagsüber (T; von 8:00 bis 18:00) das hygienische Mindestmaß von 0,5 h^{-1}. In der Nacht (N; von 18:00 bis 8:00). Außerhalb der Nutzerphase wird die Luftwechselrate je nach Variante mit 1, 2 bzw. 5 h^{-1} betrieben, um die Nachtluft zur Kühlung des Raumes zu nutzen. Das Raummodell verfügt ebenso wie Simulationsmodell 3 über keine Verschattung.

5.3.10.1 Analyse der Innenraumtemperatur über 14 Tage

Die Simulation wurde sowohl in der Variante mit als auch ohne Vorsatzschalen gerechnet.

a) ohne Vorsatzschalen

Bei den unterschiedlichen Raummodellen ist wieder wie in den vorangegangen Simulationen der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit in den Temperaturschwankungen der 24-Stunden-Periode deutlich zu erkennen (Abbildung 82; Abbildung 83; Abbildung 84).

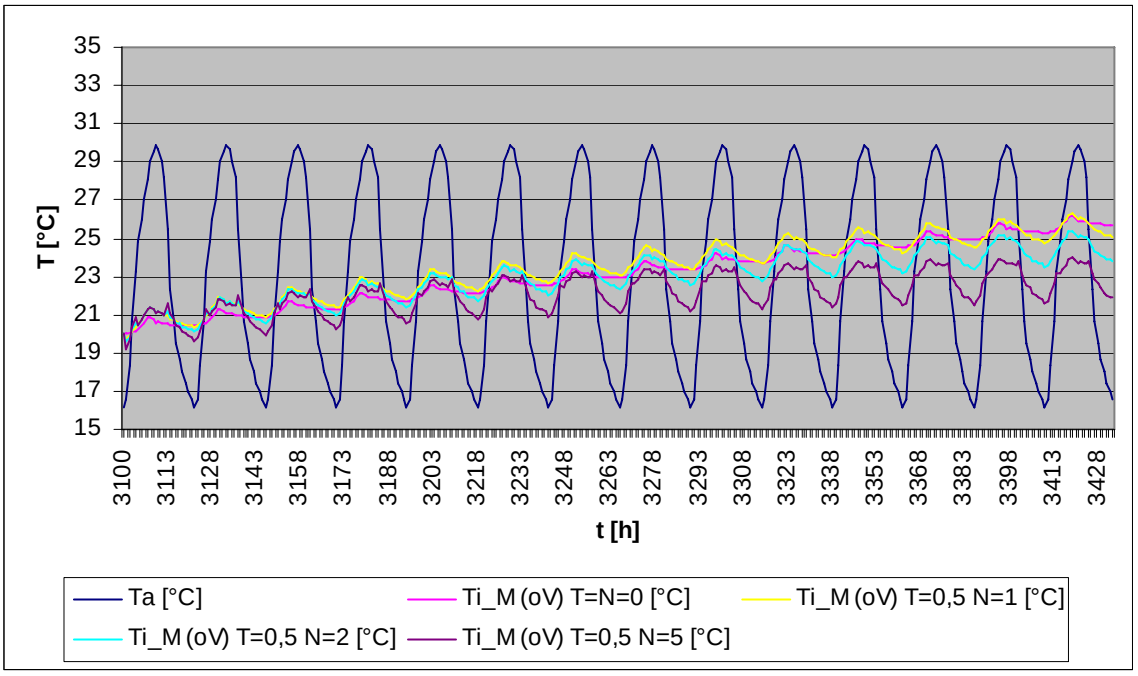

Abbildung 82: Stahlbetonbau mit tageszeitgesteuerter Ventilation (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _M = Stahlbetonbauweise, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr,
0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1},
2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}

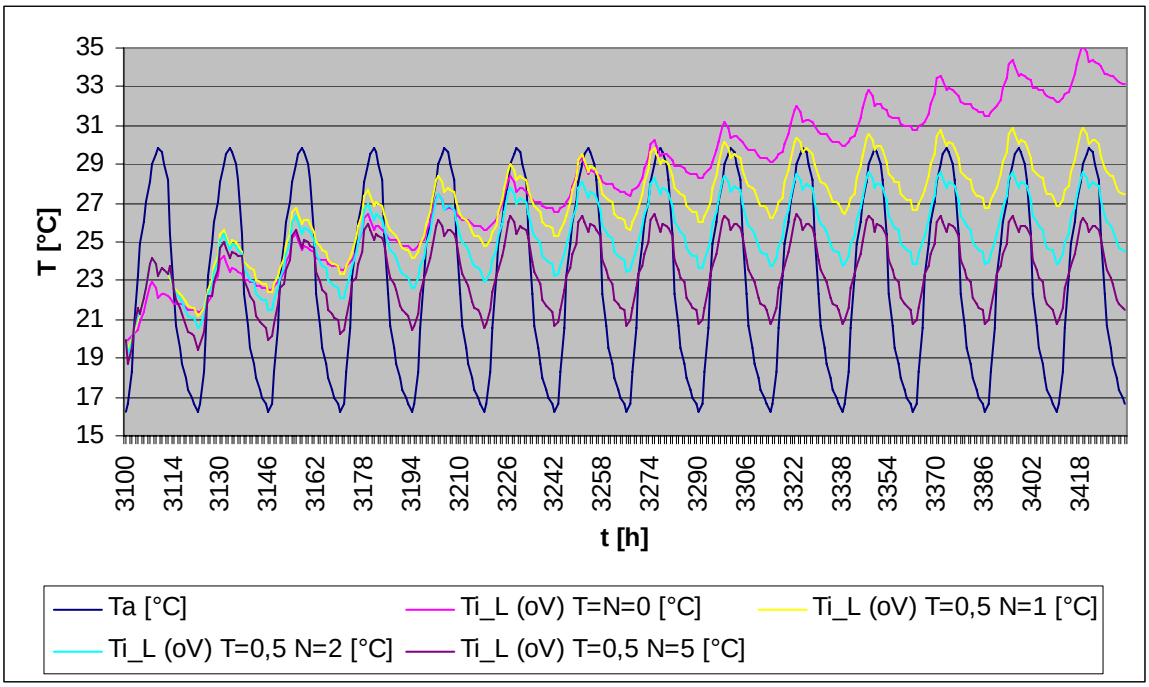

Abbildung 83: Holzleichtbau mit tageszeitgesteuerter Ventilation (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _L = Holzleichtbauweise, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr,
0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1},
2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}

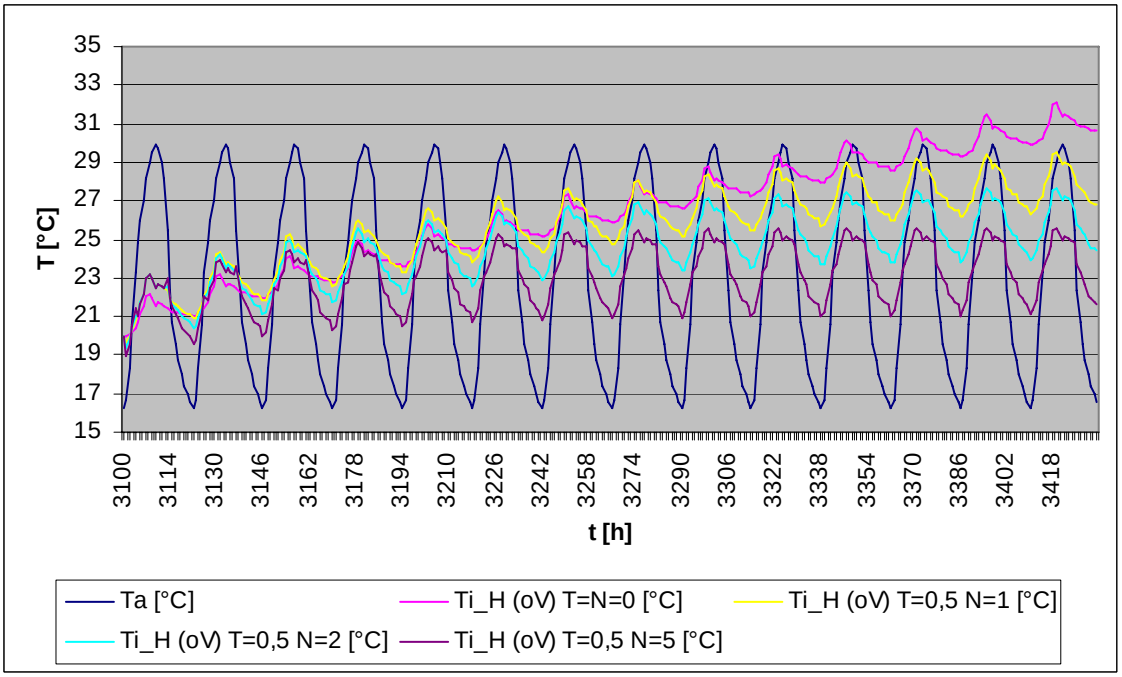

Abbildung 84: Holzmassivbau mit tageszeitgesteuerter Ventilation (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _H = Holzmassivbauweise, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr,
0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1},
2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}

b) mit Vorsatzschalen

Vorsatzschalen bewirken wieder, wie schon in den vorherigen Simulationsmodellen, eine höhere Temperaturamplitude in der 24-Stunden-Periode. Die gemittelte Temperatur nach 14 Tagen ist nahezu gleich der ohne Vorsatzschalen (Abbildung 85; Abbildung 86; Abbildung 87).

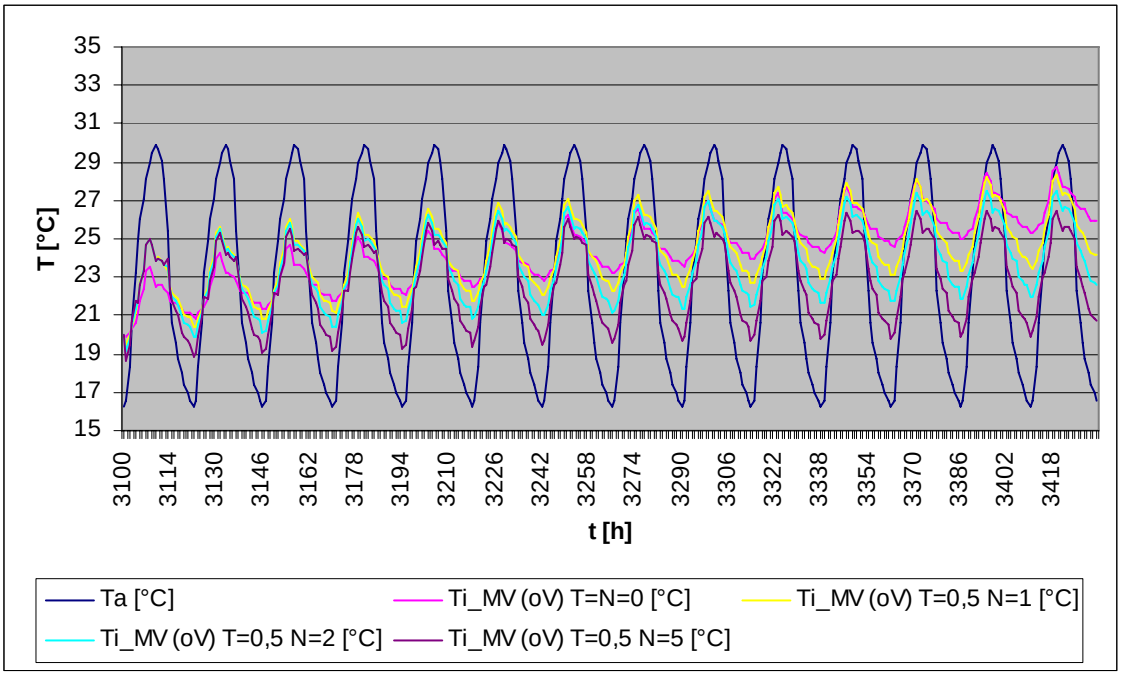

Abbildung 85: Stahlbetonbau mit Vorsatzschale und tageszeitgesteuerter Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}

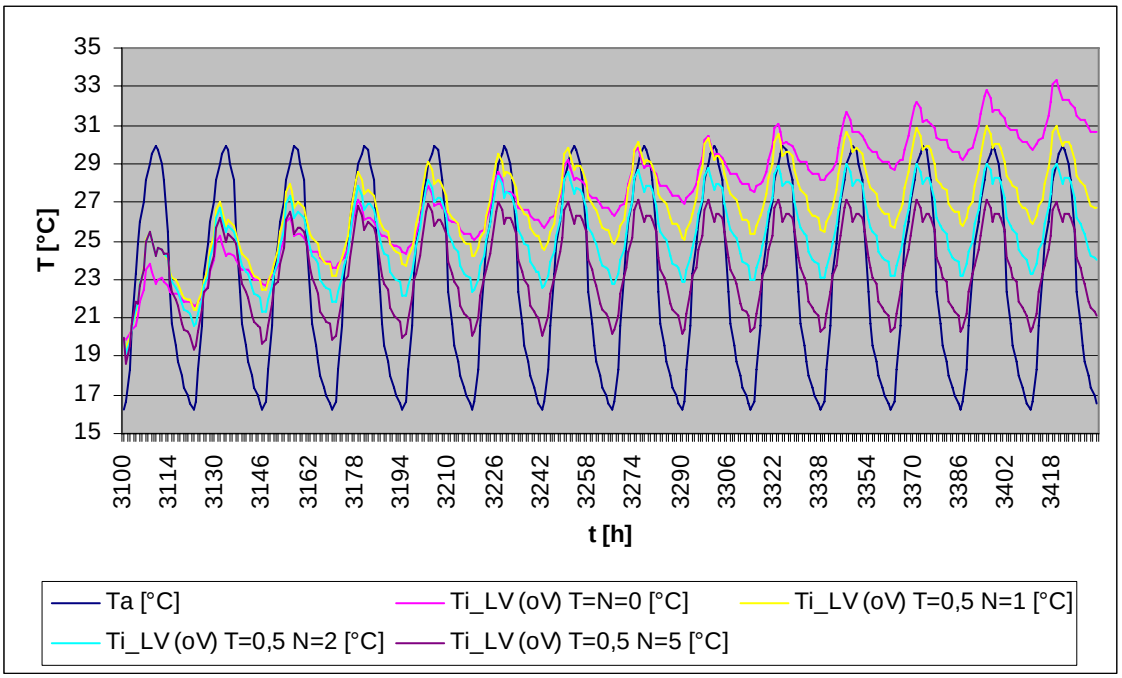

Abbildung 86: Holzleichtbau mit Vorsatzschale und tageszeitgesteuerter Ventilation (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}

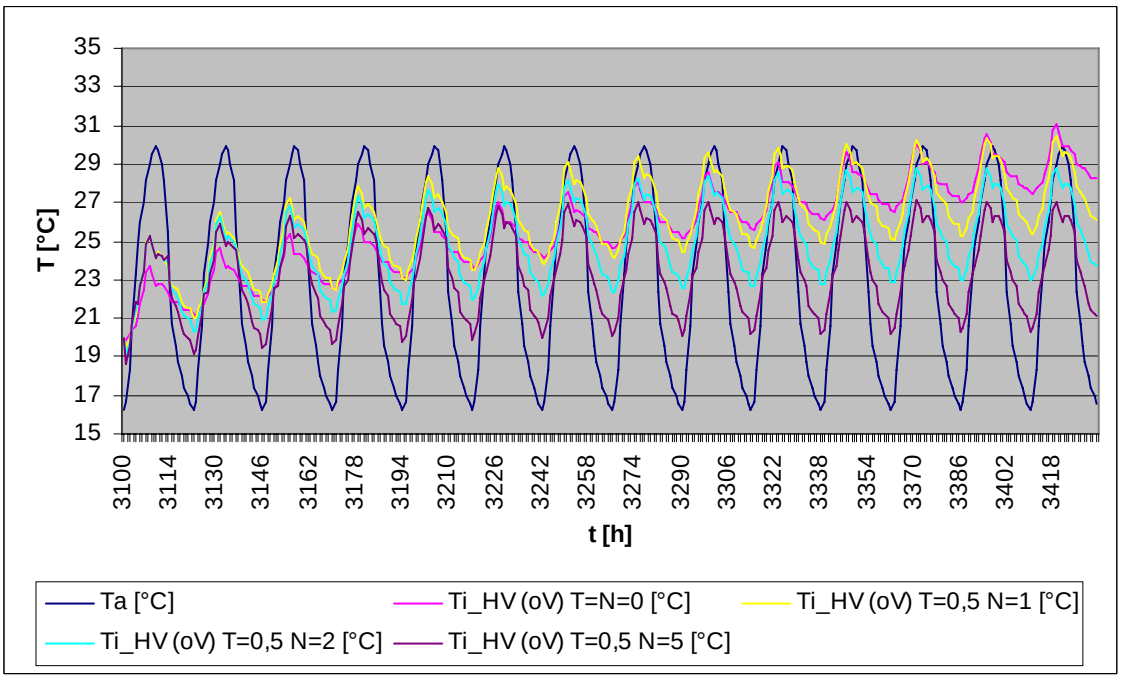

Abbildung 87: Holzmassivbau mit Vorsatzschale und tageszeitgesteuerter Ventilation (e.A.)
Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}

5.3.10.2 Analyse des eingeschwungenen Temperaturzustandes

Durch die tageszeitgesteuerte Ventilation wird der Wärmeeintrag tagsüber reduziert. Dies spiegelt sich in den etwas kleineren Temperaturamplituden wieder (Abbildung 88, Abbildung 89) verglichen mit dem Simulationsmodell 3 mit kontinuierlicher Ventilation (Abbildung 80, Abbildung 81).

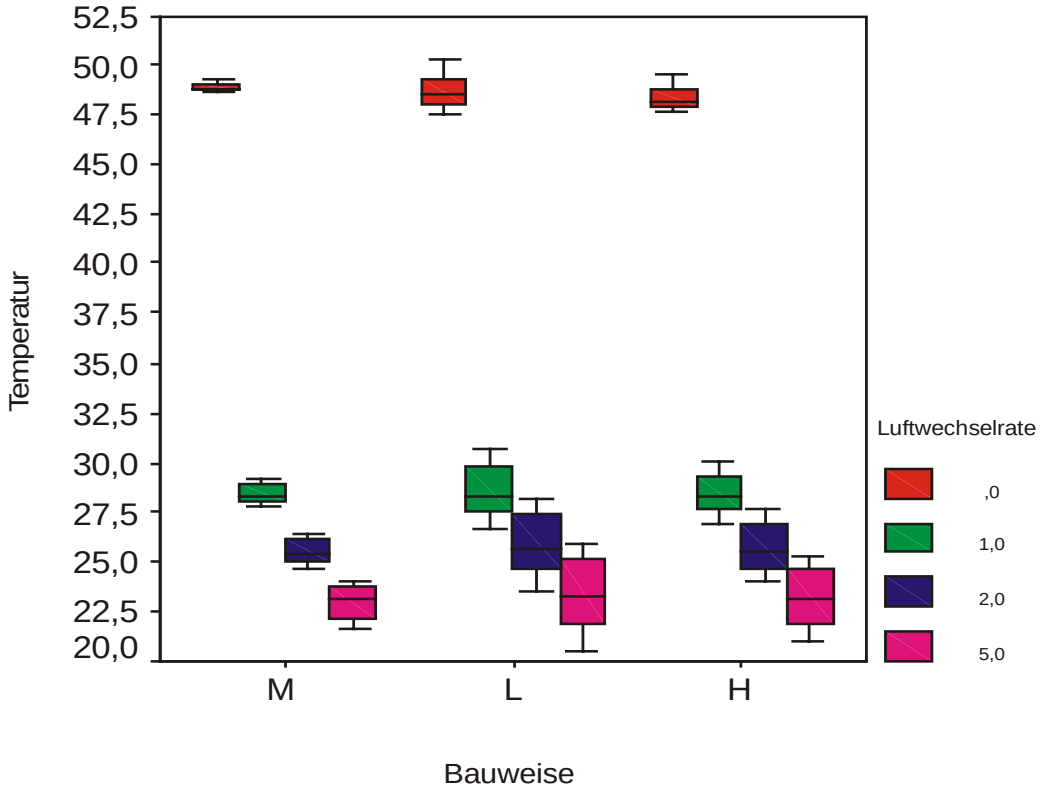

Abbildung 88: Eingeschwungener Zustand, Temperatur in Abhängigkeit der Luftwechselrate [h^{-1}] bei kontinuierlicher Ventilation, ohne Vorsatzschalen, ohne Verschattung (e.A.)
M = Stahlbetonbauweise, L = Holzleichtbauweise, H = Holzmassivbauweise

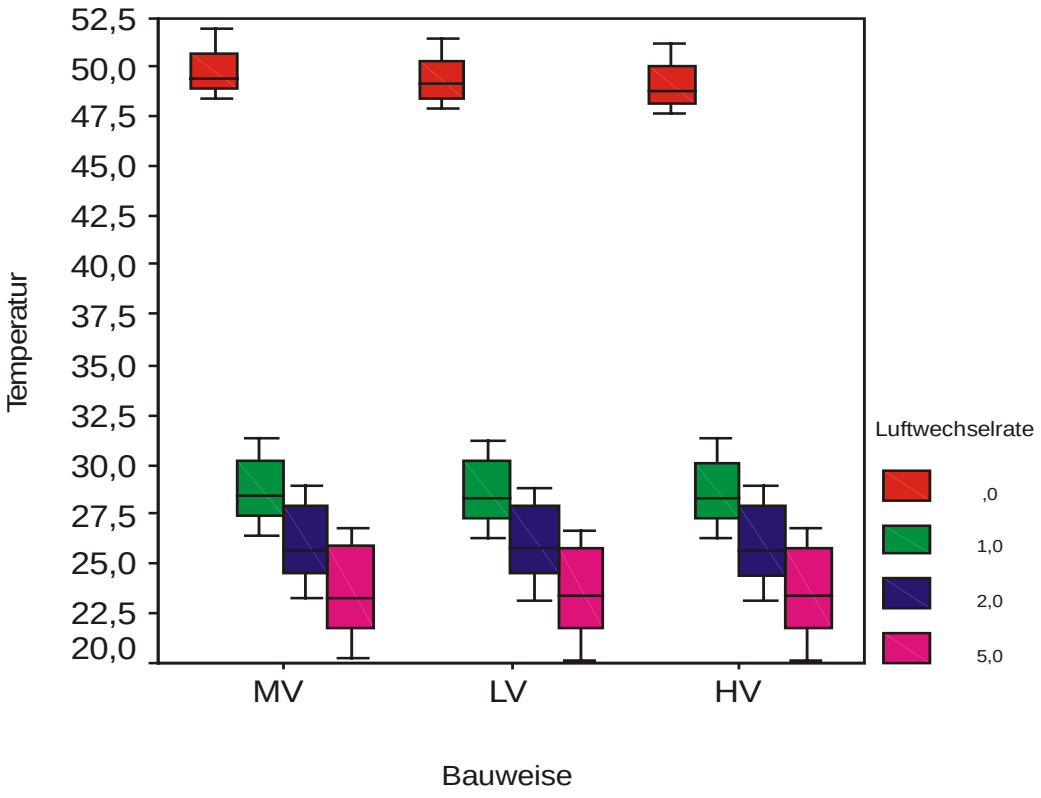

Abbildung 89: Eingeschwungener Zustand, Temperatur in Abhängigkeit der Luftwechselrate [h^{-1}] bei kontinuierlicher Ventilation, mit Vorsatzschalen, ohne Verschattung (e.A.)
MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale, LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale, HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale

5.4 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Die Simulationen konnten zeigen, dass die **Wärmespeicherfähigkeit** der raumumschließenden Bauteile einen Einfluss auf die Temperaturschwankungen im Innenraum über einen Zeitraum von 24 Stunden hat. Einzige Ausnahme bildet die Außenverschattung, welche 73 % der Energien noch absorbiert und reflektiert bevor sie zur Außenseite des Fensters gelangen. Dadurch ist der Wärmeeintrag in den Raum so gering, dass die Wärmekapazität der umgebenden Flächen so gut wie nicht genutzt werden.

Die Temperaturschwankungen waren am geringsten beim Stahlbetonbau und am größten beim Holzleichtbau. Zwischen diesen Extremen liegt der Massivholzbau.

Vorsatzschalen aller Art wie für Elektroinstallationen an den Wänden bzw. abgehängten Decken oder Distanzböden bewirken einen deutlichen Wärmewiderstand und hindern die dahinter befindlichen Bauteile verhindern die Speicherung solaren Wärmeeinträge tagsüber. In der Nacht verhalten sich Vorsatzschalen genau umgekehrt. Die Raumluft kann zum Beispiel durch Ventilation sehr rasch abgekühlt werden; die speicheraktive Masse kann wiederum nur zu einem Bruchteil aktiviert werden.

Betrachtet man die Temperaturwerte im Mittel über 14 Tage, ist nahezu kein Unterschied zwischen den Räumen mit und ohne Vorsatzschalen zu erkennen. Es scheint, dass die Vorsatzschalen dem Wärmestrom einen sehr effektiven Schutz gegenüber kurzzeitigen Temperaturschwankungen (Perioden von 24 Stunden) bieten, hingegen über längere Perioden (14 Tage) den Wärmestrom nicht davon abhalten können, in die Wand einzudringen und dort die speicherwirksamen Massen, wenn vorhanden, thermisch zu aktivieren.

Bezüglich der **Verschattungen** ergaben die Simulationen eindeutige Ergebnisse. Innenverschattungen bieten so gut wie keinen Schutz gegen die sommerliche Überhitzung von Gebäuden. Den besten Schutz bieten Außenverschattungen, welche jedoch bei Wind nur begrenzt einsatzfähig sind und den Nutzerkontakt zur Außenwelt stark einschränken bzw., wie in der Simulation gerechnet, im vollständig geschlossenen Zustand gar unmöglich machen.

Unter diesen Gesichtspunkten betrachtet zeigt die Verschattungsvariante mit Vorsprung das mit Abstand beste Ergebnis, wobei der angenommene Verschattungswinkel von 45° (Vorsprung 1,5 m auskragend und 1,5 m über der Fensterunterkante angeordnet) als zu groß angenommen wurde (Abbildung 60). Wie sich am Ende dieser Arbeit herausstellte, bieten Verschattungswinkel von 45° zwar eine optimale Verschattung der Fensterflächen, reduzieren aber auch

den Lichteinfall in das Zimmer so stark, dass es von den meisten Personen als unangenehm wahrgenommen wird. In der Praxis findet man einen Kompromiss zwischen Verschattung und ausreichendem Lichteinfall in den Raum mit einem Verschattungswinkel von 30°. Dies würde eine Verkürzung der auskragenden Platte von 1,5 m auf 0,86 m bedeuten.

Ein weiterer nicht berücksichtigter Fall in den Simulationsmodellen bei der Verschattungsvariante mit Vorsprung sind Situationen im Frühjahr und im Herbst. In diesen Fällen sind die Sonneneinträge schon bzw. noch stark genug und die Sonne steht flach über dem Horizont.

Bereits eine kontinuierliche **Ventilation** mit der hygienischen Luftwechselrate von 0,5 h^{-1} reduziert deutlich die Maximaltemperaturen verglichen zu den Simulationen 1 und 2 ohne Ventilation. Wird die Luftwechselrate noch in Abhängigkeit der Tageszeit und damit auch der Außentemperatur so gesteuert, dass tagsüber nur der hygienische Luftwechsel von 0,5 h^{-1} stattfindet, kann erstens der Wärmeeintrag über die Zuluft minimiert werden und zweitens die kalte Nachluft genutzt werden, um mit höheren Luftwechselraten das Gebäude zu kühlen. Hier sei ebenfalls auf die Vereinfachung im Modell hingewiesen, dass keine internen Wärmelasten angenommen wurden und dass bei der gewählten Raumgeometrie der simulierten Raummodelle die Fensterfläche mit 30 % der Südfassade sehr gering ist. Darum reichen in den Simulationen schon geringe Luftwechselraten von 0,5 h^{-1} bis 1 h^{-1}, je nach Raummodell, um die Temperatur konstant zu halten.

Aus diesen Ergebnissen lassen sich folgende **Grundsätze**, geordnet nach der größten Wirksamkeit, zur **Vermeidung der sommerlichen Überwärmung** von Gebäuden ableiten:

1. Die solaren Gewinne müssen über den Sommer so stark wie möglich reduziert werden. Die Einstrahlung auf die Fenster muss vermindert werden. Auskragende Vorsprünge oberhalb der Fenster bieten einen guten Kompromiss zwischen Innenraumtemperatur und Wohnqualität (Sichtkontakt nach außen).
2. Vorhandene Speichermassen in den Bauteilen bewirken ein Abschwächen der Temperaturspitze, allerdings nur:
    a) wenn diese nicht durch Vorsatzschalen verbaut sind
    b) wenn man die Möglichkeit schafft, die gespeicherte Wärme wieder abzuführen, zum Beispiel während der Nacht durch Ventilation.

5.5 Diskussion der Simulationsergebnisse

Wie die Simulationen gezeigt haben, ist eine wirksame Verschattung der Fenster an der Außenseite der Fassade (Vorsprung, Außenjalousie) während des Sommers der beste Schutz gegen sommerliche Überwärmung der Innenräume.

Die Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen bewirkt ein Dämpfen der Temperaturspitzen. Gibt es jedoch keine Möglichkeit während des Tageszyklus die gespeicherte Wärmeenergie wieder abzuführen, stellt sich über kurz oder lang (in Abhängigkeit der Größe der zur Verfügung stehenden speicherwirksamen Masse) ein eingeschwungener Zustand ein, der bei allen drei Raummodellen nahezu die gleiche mittlere Temperatur aufweist. Lediglich die Temperaturamplituden im Tagesgang sind im eingeschwungenen Zustand bei kleineren speicherwirksamen Massen größer.

Die ÖNORM B 8110-3 gibt nur Auskunft über die maximalen Temperaturen, die im Sommer nicht überschritten werden dürfen (tagsüber 27 °C, nachts 25 °C).

Die Norm gibt keine Auskunft über die maximal zulässigen Temperaturamplituden über eine Periode von 24 Stunden.

Zur Vereinfachung der Simulation wurde in dieser Arbeit eine mechanische Ventilation mit konstanten Luftwechselraten gewählt, die eine wirksame Kühlung des Innenraums zeigten.

Des Weiteren ist eine freie Lüftung der Räume, wenn es die Umgebungssituationen (z.B.: Lärm, Sicherheit) zulassen, einer mechanischen Ventilation vorzuziehen, da diese keine elektrische Energie für das Ventilationssystem benötigt.

Wie schon bei den Aufbauten erwähnt, wurden als Raummodelle bewusst Extremata verwendet, sowohl der reine Stahlbetonbau als auch der Holzleichtbau. Der Holzleichtbau schnitt bei den Simulationen schlechter ab als in der Realität, da inhomogene Bauteilschichten programmtechnisch nicht realisiert werden konnten und dadurch die Holzrahmen und Lattungen in den Wänden sowie die Träme in der Geschossdecke und damit deren spezifische Wärmekapazität nicht berücksichtigt werden konnten.

Zur Simulation an sich kann noch angemerkt werden, dass das Ergebnis zum einen von den physikalischen Berechnungen des Softwarepaktes und zum anderen von den Eingangsparametern abhängt. Alle in der Simulation verwendeten Werkstoffparameter (Wärmeleitfähigkeit, spezifischen Wärmekapazität und Rohdichte) wurden dem Passivhaus-Bauteilkatalog (Waltjen et al. 2008) entnommen.

Im Rahmen der Literaturrecherche für diese Arbeit fanden sich in unterschiedlichen Publikationen unterschiedliche Kennwerte für die spezifische Wärmekapazität, die zum Teil deutlich voneinander abweichen. Eine Auswahl davon zeigt Tabelle 23.

Tabelle 23: Spezifische Wärmekapazität von Holz in unterschiedlichen bauphysikalischen Publikationen.

Literaturquelle	Holzfeuchte [%]	Wärmekapazität c [kJ/(kgK)]	Rohdichte ρ [kg/m³]
Hegger et al. 2008	-	1,6	500
Hausladen et al. 2006	-	1,6	700
Waltjen et al. 2008	-	2	500
Bläsi 2002	-	2,1	-
Liersch und Langner 2006	-	2,1	-
Zürcher und Frank 1998	-	2,2	500
Hilbig 1999	-	2,5	-
Wagenführ und Scholz 2008	0	1,3	-
	100	2,8	-

Bei allen in der Tabelle aufgeführten Publikationen (ausgenommen Wagenführ und Scholz 2008) konnten keine Hinweise auf die Holzfeuchte gefunden werden. Der Einfluss des Wassers mit seiner spezifischen Wärmekapazität von 4,2 kJ/(kg K) auf die Wärmespeicherfähigkeit ist jedoch sicherlich nicht von der Hand zu weisen.

Lediglich in der Publikation von Niemz (1993) sind genaue Angaben bezüglich der Wärmekapazität in Abhängigkeit der Holzfeuchte zu finden (Tabelle 24, Abbildung 90) sowie die Anmerkung, dass der Einfluss der Rohdichte auf die spezifische Wärmekapazität vernachlässigbar gering ist.

Tabelle 24: Spezifische Wärmekapazität von Holz in Abhängigkeit der Holzart/Rohdichte und der Holzfeuchte (Niemz 1993)

Holzfeuchte ω [%]	Fichte (ρ = 420 kg/m³) c [kJ/(kg K)]	Kiefer (ρ = 490 kg/m³) c [kJ/(kg K)]	Eiche (ρ = 640 kg/m³) c [kJ/(kg K)]	Buche (ρ = 660 kg/m³) c [kJ/(kg K)]
0	1,35	1,41	1,45	1,46
5	1,51	1,54	1,59	1,6
10	1,63	1,66	1,67	1,71
15	1,8	1,87	1,91	1,92
20	2,18	2,33	2,37	2,31
100	2,8	2,8	2,79	2,83

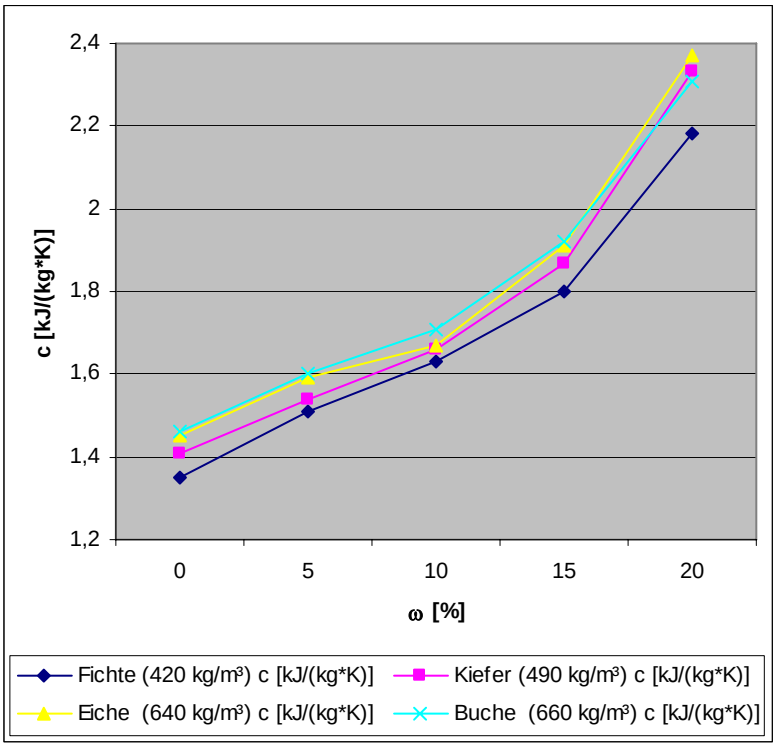

Abbildung 90: Spezifische Wärmekapazität von Holz in Abhängigkeit der Holzart/Rohdichte und der Holzfeuchte (e.A. nach Niemz 1993)

Aus dem Loughborough Diagramm, dass die Holzfeuchte in Abhängigkeit der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung angibt, kann man für 20 °C und 50 % relative Luftfeuchtigkeit (Innenraum) eine Holzfeuchte von ω ~ 9 % ablesen (Abbildung 91).

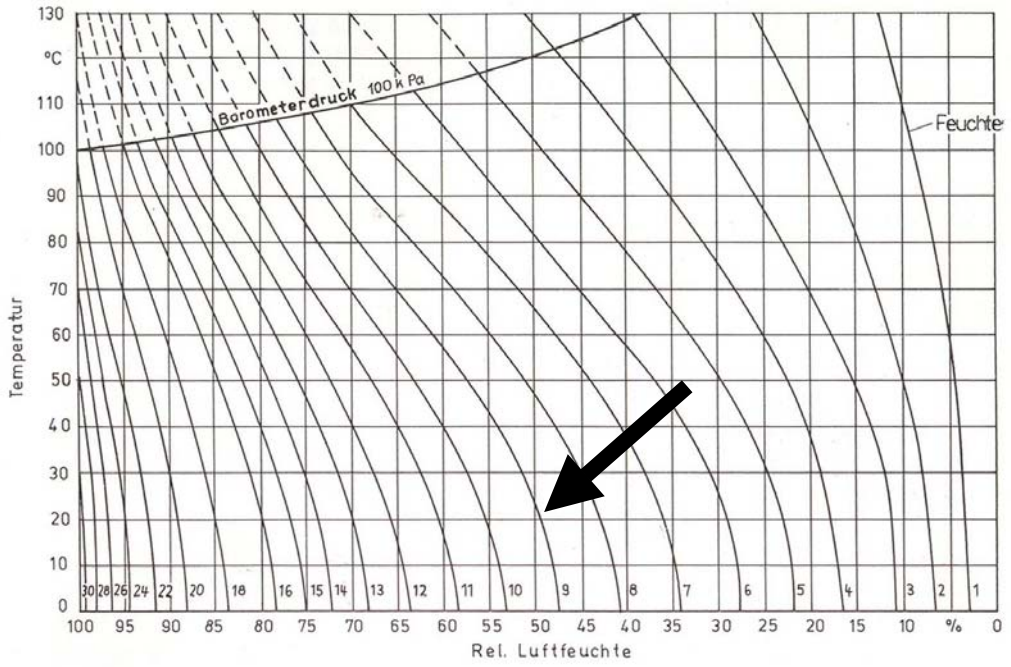

Abbildung 91: Loughborough-Diagramm - Hygroskopisches Gleichgewicht von Holz in Abhängigkeit der Temperatur und relativen Luftfeuchte (Niemz 1993).

Somit ist die spezifische Wärmekapazität von Holz mit 2 kJ/(kg K), welche für die Simulation angenommen wurde, bereits recht optimistisch gewählt. Laut Tabelle 24 und Abbildung 90 ergibt sich für ω = 9 % eine spezifische Wärmekapazität von 1,6 kJ/(kg K).

Anhand der simulierten Modelle und der Ergebnisse sieht man sehr gut, dass eine große Anzahl an Faktoren Einfluss auf die Ergebnisse nimmt. Selbst Modelle, die auf ein absolutes Minimum reduziert wurden, liefern bereits eine Fülle von Erkenntnissen. Dem Autor ist bewusst, dass die simulierten Modelle nicht im vollen Umfang der Realität entsprechen. Eine detailgetreuere Simulation hätte den Umfang dieser Arbeit weit überschritten.

Die Fragestellung nach dem Einfluss der Wärmekapazität der raumumschließenden Flächen auf die Innenraumtemperatur konnte mit den zur Verfügung stehenden Mitteln aber beantwortet werden.

Ausblick

6. Ausblick

Seit mit dem Bau des ersten Passivhauses 1991 wurde im Bauwesen viel bewegt. Heute ist das Passivhaus ein Gebäudestandard, der nicht nur im Bereich des Einfamilienhausbaus täglich realisiert wird. Beispiele wie die alpine Schutzhütte am Hochschwab, das Schiestlhaus, zeigen, dass Passivhäuser auch in klimatischen Extremlagen funktionieren. Die Passivhaustechnologie hat auch schon in den großvolumigen Wohnbau Einzug gehalten, z.B.: Roschégasse 20, 1110 Wien; SolarCity Pichling, Linz; Kammelweg 10, 1210 Wien.

Das Passivhaus benötigt weniger als ein Zehntel der Heizenergie verglichen mit den Häusern im Bestand. Wie die Arbeit zeigt, gibt es Massivholzsysteme, mit denen Niedrigstenergie- und Passivhäuser realisierbar sind, welche durch ihren Einsatz von heimischen NAWAROS langfristig CO_2 speichern.

Die Idee, dass Häuser im Winter nahezu ohne Heizung nur durch die solare Strahlung ein behagliches Raumklima bieten, war vor wenigen Jahrzehnten noch undenkbar, da die Energie aus Kohlenwasserstoffen billig war und die Ressourcen unbegrenzt schienen.

Einen wertvollen Beitrag gegen die sommerliche Überwärmung in Passivhäusern könnten zukünftig vertikal verschiebbaren Fensterläden (Abbildung 92) mit integrierten thermischen Kollektoren bzw. Photovoltaikzellen leisten. Sie würden nicht nur im Sommer eine optimale Verschattung der Fenster in Abhängigkeit des Sonnenstandes gewährleisten, sondern auch Warmwasser bzw. Strom produzieren, da sie immer den Jahreszeiten entsprechend optimal zur Sonne orientiert sind.

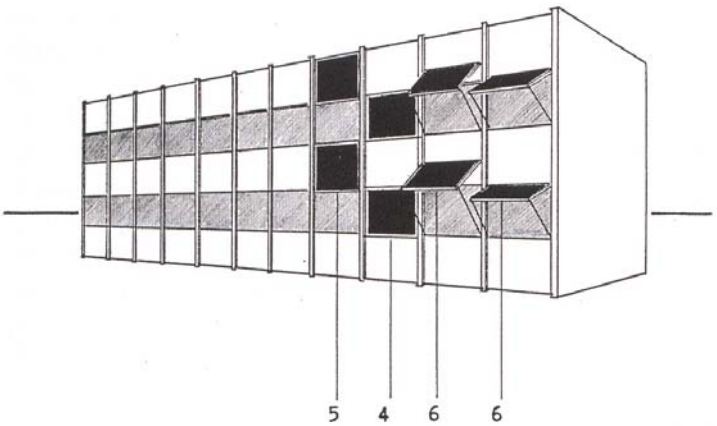

Abbildung 92: Vertikal verschiebbare Fensterladen-Sonnenkollektoren in Wintertagstellung (5), Winternachtstellung (4) Sommertag- und Sonnenschutzstellung (6) (Treberspurg 1999).

Zusammenfassung

7. Zusammenfassung

Wie die Recherche des Autors ergeben hat, gibt es in Österreich neun Unternehmen, die sich auf die Produktion von Massivholzbausystemen, welche nur aus genagelten, geschraubten und gedübelten Verbindungen bestehen, spezialisiert haben.

Die Ausführungsformen sind unterschiedlich und reichen von stab- über platten- und scheiben- bis kastenförmige Aufbauten. Die größte Gruppe stellen die Brettstapelelemente dar, die es in den Ausführungsformen genagelt und gedübelt angeboten werden. Bei den meisten Unternehmen handelt es sich um Klein- und Mittelbetriebe, welche primär in der Region ihre Systeme an den Endkunden absetzen. Die genagelten, geschraubten und gedübelten Massivholzbausysteme bedienen im Moment einen kleinen aber kontinuierlich wachsenden Markt von Konsumenten.

Mit Hilfe einer bauphysikalischen Simulationssoftware konnte das Verhalten der Innenraumtemperatur in Abhängigkeit von unterschiedlichen Wand- und Deckenaufbauten bei sommerlichen Bedingungen über einen Zeitraum von 14 Tagen und im eingeschwungen Zustand errechnet werden. Es wurden drei Raummodelle angenommen: Holzleichtbau-, Stahlbetonbau- und Massivholzbauweise. Das Raummodell ist Teil eines mehrgeschossigen Gebäudes und ist mit der Fensterfront gegen Süden ausgerichtet. Die Größe des Fensters beträgt ca. 30 % der Südfassade. Für das Gebäude wurde eine Nutzung tagsüber zugrunde gelegt, d.h. die Nutzungsphase ist von 8:00 bis 18:00. Die Ergebnisse zeigten deutlich, dass hohe spezifische Wärmekapazitäten der raumumschließenden Flächen die Temperaturamplitude während des Tagesganges deutlich dämpfen. Beim Holzleichtbau haben sich die größten und beim Stahlbetonbau die geringsten Temperaturamplituden eingestellt. Der Massivholzbau nimmt eine Stellung zwischen dem Holzleichtbau und dem Stahlbetonbau ein. Alle Simulationen wurden auch mit einer Vorsatzschalenvariante gerechnet. Dies ergab, dass die Vorsatzschalen im Tagesgang das Wärmespeichervermögen bei der Stahlbetonbau- und Holzmassivbauweise nahezu zur Gänze „wegdämmen“. Die Temperaturamplituden entsprachen denen der Holzleichtbauweise ohne Vorsatzschale.

Über die ganzen 14 Tage betrachtet hatten die Vorsatzschalen nur eine geringe Bedeutung in Bezug auf die gemittelten Endtemperaturen. Diese lagen bei der Variante mit Vorsatzschalen nur geringfügig höher als bei der Variante ohne Vorsatzschale.

Ein Simulationsmodell mit verschiedenen Verschattungen ergab das beste Ergebnis (ist gleich niederste Raumtemperatur) für die Außenverschattung. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass in der Simulation die Verschattung von 0 - 24 Uhr angenommen wurde d.h. die Außenjalousien sind immer geschlossen. Eine Verschattung durch einen Vorsprung über dem Fenster ergab ebenfalls ein akzeptables Ergebnis. Durch den hohen Sonnenstand im Sommer wird das Fenster durch den Vorsprung über die Mittagszeit zur Gänze verschattet, lediglich in den Morgen- und Abendstunden gibt es kleine solare Einträge durch das Fenster in den Raum. Anzumerken ist bei diesem Versuchsaufbau mit Vorsprung, dass die kritischen Tage bezüglich sommerlicher Überhitzung in den Übergangszeiten liegen, wenn die Sonne schon/noch eine starke Solarstrahlung liefert aber tief über den Horizont steht und damit der Vorsprung das Fenster nur zum Teil verschatten kann. Es konnte gezeigt werden, dass Innenverschattungen so gut wie keinen Schutz gegen sommerliche Überhitzung bieten.

Durch eine konstante Luftwechselrate ist es selbst ohne Verschattung möglich, die Maximaltemperaturen deutlich zu reduzieren. Verbesserte Ergebnisse lieferten die Steuerung der Ventilation mit der Tageszeit. In der Nacht, wenn die Außentemperatur geringer als die Innentemperatur ist, wurde mit einer höheren Luftwechselrate die warme Innenraumluft abgeführt. Tagsüber wurde die Luftwechselrate auf das hygienische Mindestmaß reduziert um zusätzliche konvektive Wärmeeinträge zu verhindern.

Abschließend ist noch anzumerken, dass ein hohes Wärmespeichervermögen der raumumschließenden Gebäudeteile deutlich die Tagestemperaturamplitude reduziert, dass aber die gespeicherte Wärmeenergie zum Beispiel durch Nachlüftung abgeführt werden muss, damit die Wärmespeicher auch wieder entladen werden. Andernfalls führt selbst beim Stahlbetonbau mit hoher speicherwirksamer Masse über einen längeren Zeitraum betrachtet zu den gleichen unbehaglichen Zuständen wie der Holzleichtbau.

Es konnte in der Arbeit gezeigt werden, dass die spezifische Wärmekapazität der raumumschließenden Flächen einen Einfluss auf die Raumtemperatur hat. Aber zur Vermeidung von sommerlicher Überwärmung sind eine wirksame Verschattung der Fenster sowie Ventilation während der Nachtstunden obligat.

Quellenverzeichnis

Quellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

AEIOU, http://aeiou.iicm.tugraz.at/aeiou.encyclop.w/w078488.htm (12.1.2009)

ALBERS K J (2001) Moderner Holzhausbau in Fertigbauweise. WEKA Media, Kissing (ISBN 3-8277-1195-9)

AMBROZY H G, GIERTLOVÁ Z (2005) Planungshandbuch Holzwerkstoffe: Technologie - Konstruktion – Anwendung. Springer, Wien (ISBN 3-211-21276-0)

BLÄSI W (2002) Bauphysik. Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten (ISBN 3-8085-4264-0)

BÖHLMANN D (2008) Warum Bäume nicht in den Himmel wachsen, Quelle & Meyer, Wiebelsheim (ISBN 978-3-494-01420-3)

Bundesministerium für Land- und Frostwirtschaft (2007) Daten und Zahlen 2007. Wien: Eigenverlag.

DORNER G (2003) Ökobilanzierung des Massivholzbausystems Naturi. Kuchl: Diplomarbeit. FH-Kuchl.

FECHNER J, LIPP B, LECHNER R (s.a. a) Öko in Form - Folder 3 - Passivhaus aus nachwachsenden Rohstoffen, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, A-1014 Wien, Rosengasse 2-6, at: http://www.ecology.at/oekoinform/Oekoinform_3.pdf (6.1.2009)

FECHNER J, LIPP B, LECHNER R (s.a. b) Öko in Form - Folder 4 - Bauteile aus nachwachsenden Rohstoffen, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 1014 Wien, Rosengasse 2-6, at: http://www.ecology.at/oekoinform/Oekoinform_4_Boden.pdf (6.1.2009)

FEIST W (2006) http://www.passivhaustagung.de/Kran/Passivhaus_Kranichstein_15Jahre.pdf (18.02.2009)

FENGEL D, WEGENER G (1989) Wood – Chemistry, Ultrastructure, Reactions, Walter de Gruyter, Berlin, Wien (ISBN 3-11-008481-3)

GROBBAUER M (2008) Wärmeschutz - Glossar bauphysikalischer Eigenschaften von Holz, Holz Bauen Energie sparen. Pro Holz, Zuschnitt 30, Wien.

HÄHNEL E, HÄHNEL S (2007) Holzbau und Holzschutz von A bis Z. Huss-Medien, Berlin (ISBN 978-3-345-00878-8)

HAUSLADEN G, SALDANHA M, LIEDL P (2006) ClimaSkin – Konzepte für Gebäudehüllen, die mit weniger Energie mehr leisten. Callwey, München (ISBN 3-7667-1677-8)

HEGGER M, FUCHS M, STARK M, ZEUMER M (2008) Energie Atlas – Nachhaltige Architektur, Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin (ISBN 978-3-7643-8385-5)

HILBIG G (1999) Grundlagen der Bauphysik: Wärme-Feuchte-Schall. Fachbuchverlag Leipzig, München, Wien (ISBN 3-446-21245-0)

IG Passivhaus Österreich, http://www.igpassivhaus.at/%C3%96sterreich/Service/GrafikenStatistiken/t

abid/114/language/de-DE/Default.aspx#passivhausstatistiken (12.01.2009)

KLH, http://www.klh.at/produkt-brettsperrholz-klh.html (06.01.2009)

KOLB J (2008) Holzbau mit System – Tragkonstruktionen und Schichtaufbau der Bauteile. Birkhäuser, Schweiz (ISBN 978-3-7643-8823-2)

Lebensministerium, http://forst.lebensministerium.at/article/articleview/60285/1/14173/ (06.01.2009)

LIERSCH K W, LANGNER N (2006) Bauphysik kompakt: Wärme-Feuchte-Schall. Bauwerk, Berlin (ISBN 3-89932-105-7)

LOHMANN U (2003) Holz-Lexikon. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen. (ISBN 3-87181-355-9)

MERL A D (2005) Bau - Ressourcenmanagement in urbanen Räumen, Fallstudie Wien. Wien: Dissertation. Technische Universität Wien.

NIEMZ P (1993) Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen (ISBN 3-87181-324-9)

PIERER H, FELLNER J, GAMERITH H, HÖFLER K, PÖHN C, RIEBENBAUER J, SCHOBER K P, SPATT M, TEISCHINGER A (2000) Holzbau Handbuch. Österreichischer Agrarverlag, Leopoldsdorf (ISBN 3-7040-1564-4)

SCHOBER K P (2002) Mehrgeschossiger Holzbau in Österreich. Holzskelett- und Holzmassivbauweise. Pro Holz, Wien (ISSN 1680-4252)

SCHRENTEWEIN T (2008) Klima Haus – Bauen mit Holz. Edition Raetia, Bozen (ISBN 978-88-7283-309-4)

STANEK R (2008) Ansatz zur Erfassung der Wertschöpfung und des Holzverbrauchs im Holz-Fertighausbau Niederösterreichs. Wien: Diplomarbeit. Universität für Bodenkultur.

TEISCHINGER A (1987) Feuchtigkeitsausgleichende Wirkung von Holz in Innenräumen. Wien: Dissertation. Universität für Bodenkultur.

THOMA E (2003) Für lange Zeit – Leben und Bauen mit Holz. Alte Weisheiten für moderne Technologien. Brandstätter, Wien (ISBN 3-85498-297-6)

TREBERSPURG M (1999) Neues Bauen mit der Sonne – Ansätze für eine klimagerechte Architektur. Springer, Wien (ISBN 3-211-82940-7)

TREBERSPURG M, ERTL U, GEISSLER S; REIM T, SMUTNY R (2006) Ressourcenorientiertes Bauen. s.l. unveröffentlichtes Skript.

WAGENFÜHR A, SCHOLZ F (2008) Taschenbuch der Holztechnik. Fachbuchverlag Leipzig, München (ISBN 978-3-446-22852-8)

WALTJEN T, POKORNY W, ZELGER T, TORGHELE K, MÖTZL H, BAUER B, BOOGMANN P, ROHREGGER G, UNZEITIG U (2008) Passivhaus-Bauteilkatalog, Springer, Wien (ISBN 978-3-211-29763-6)

WINTER W, DREYER J, SCHÖBERL H (2001) Holzbauweisen für den verdichteten Wohnbau. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien

ZÜRCHER C, FRANK T (1998) Bauphysik. vdf, Zürich (ISBN 3-7281-1822-2)

ZWIENER G, MÖTZL H (2006) Ökologisches Baustoff-Lexikon. C.F. Müller, Heidelberg (ISBN 978-3788076863)

Verzeichnis persönlicher Mitteilungen

BERGER O (18.09.2008) Otmar Berger Zimmerei und Sägewerk, Pernitz.

GANAUS G (16.09.2008) Holzsystembau Georg Ganaus, Mank.

GREBER K (25.09.2008) Kasper Greber Holz-Wohnbau GmbH, Bezau.

HOLLINSKY K H (14.10.2008) Holzbau II Vorlesung, Technische Universität, Wien.

KEMPF A (24.09.2008) Sohm Holzbautechnik GesmbH, Alberschwende.

KERN L (09.01.2009) ATMO, Kirchenstrasse 13, 3243 St. Leonhard am Forst.

LONGIN D (17.09.2008) Holzbau Willibald Longin GmbH, Dobersberg.

MÖTZL H (05.03.2009) Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie GmbH, Wien.

Verzeichnis telefonischer Mitteilungen

BALDAUF D (27.10.2008) oa.sys baut gmbh.

ESTERBAUER K H (28.10.2008) Holzhäuser Esterbauer.

LORÜNSER C (08.10.2008) Walch GmbH.

RIESER E (28.10.2008) Ing. Erwin Thoma Holz GmbH.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Passivhausentwicklung in Österreich von 1995 - 2010 (e.A. nach IG Passivhaus Österreich 2009) 14
Abbildung 2: Lebenszyklusanalyse von verschiedenen Gebäudestandards über eine Lebensdauer von 80 Jahren. (e.A. nach Treberspurg et al. 2006). 15
Abbildung 3: Ökokennzahlen GWP, AP und PEI ne für Metalle (e.A. nach Mötzl 2009). 17
Abbildung 4: Ökokennzahlen GWP, AP und PEI ne für Baustoffe (e.A. nach Mötzl 2009). 17
Abbildung 5: Ökokennzahlen GWP, AP und PEI ne für Holz und Holzwerkstoffe (e.A. nach Mötzl 2009). 23
Abbildung 6: Entwicklung der Holzbauweisen (e.A. nach Schober 2002) 27
Abbildung 7: Blockbau (Schober 2002) 29
Abbildung 8: Pfahlbau (Albers 2001) 29
Abbildung 9: Detail Bohlenbau (Hähnel und Hähnel 2007) 29
Abbildung 10: Fachwerkbau (Schober 2002) 29
Abbildung 11: Rippenbau - Konstuktionsart Balloon-Frame (Ambrozy und Giertlová 2005) 30
Abbildung 12: Rippenbau - Konstuktionsart Platform-Frame (Ambrozy und Giertlová 2005) 30
Abbildung 13: Rahmenbau (Kolb 2008) 30
Abbildung 14: Skelettbau (Ambrozy und Giertlová 2005) 30
Abbildung 15: Holz-Massivbau (Tafelbauweise) (Ambrozy und Giertlová 2005) 30
Abbildung 16: Aktuelle Entwicklungen der Holzbauweisen (e.A.) 31
Abbildung 17: Einteilung der modernen Massivholzbauweisen und die Zuordnung der Unternehmen und ihrer Produkte (e.A.). 34
Abbildung 18: gedübeltes Brettstapelholz, genageltes Brettstapelholz und gedübeltes Brettsperrholz (e.A. nach Kolb 2008). 36
Abbildung 19: Standorte der Hersteller von genagelten, geschraubten und gedübelten Massivholzsystem (e.A.). Legende siehe Tabelle 1. 39
Abbildung 20: Vollstab – Querschnitt und 3D Ansicht (Kern 2009). 42
Abbildung 21: Halbstab – Querschnitt und 3D Ansicht (Kern 2009). 43
Abbildung 22: Querschnitt durch eine 30cm Naturi-Wand, 9 Nut-Feder Verbindungen quer zur Wind- und Wandrichtung (e.A. nach Kern 2009). .. 43
Abbildung 23: 30cm Naturi-Wand (3D Ansicht) (Ganaus 2008). 43
Abbildung 24: Federleisten drücken durch austrocknen die Nut Feder Verbindung aneinander (e.A. nach Kern 2009). 44
Abbildung 25: Düppelbausystem Londek (e.A.) 47

Abbildung 26: Brettstapelsystem Londyb (e.A.) 47
Abbildung 27: Brettstapel (Dicke > 14,5cm) mit diagonal versetzten Dübeln (e.A.). 48
Abbildung 28: Brettstapelsystem der Firma Holzbau Berger (e.A.). 50
Abbildung 29: Diagonal Dübelholz Brettstapelelement (e.A.)..... 51
Abbildung 30: Oberflächenprofil Glattkant (mit stumpf gestoßenen Lamellen) (e.A.). 53
Abbildung 31: Oberflächenprofil Glattkant (mit profiliert gestoßenen Lamellen) (e.A.). 53
Abbildung 32: Oberflächenprofil Schattennut (mit profiliert gestoßenen Lamellen) (e.A.). 53
Abbildung 33: Oberflächenprofil Akustikprofil (mit profiliert gestoßenen Lamellen) (e.A.). 54
Abbildung 34: Oberflächenprofil Sägeroh-Stumpf-Profil (mit profiliert gestoßenen Lamellen) (e.A.)..... 54
Abbildung 35: Oberflächenprofil Lehmputz-Strukur-Profil (mit profiliert gestoßenen Lamellen) (e.A.)..... 54
Abbildung 36: Brettstapelsystem Nadelstreifholz plus (e.A.). 55
Abbildung 37: Nadelstreifholz plus mit eingesetzter Elektroinstallationsleitung (e.A.). 57
Abbildung 38: Nadelstreifholz plus in der Oberflächenausführung Fase (e.A.). . 57
Abbildung 39: Nadelstreifholz plus in der Oberflächenausführung Rundung (e.A.). 57
Abbildung 40: Lamelle des Brettstapelsystems „massiven Naturholzwand“ (e.A.). 59
Abbildung 41: Brettstapelsystem „massive Naturholzwand“ mit einer Dicke von 12 cm, verdübelt mit einem 2 cm Hartholzdübel welcher die vertikalen Kräfte abträgt (e.A.). 60
Abbildung 42: Brettstapelsystem mit Nagelschema (e.A.)..... 62
Abbildung 43: Sichtqualität mit Ausnehmung und gefasster Kante (e.A.). 62
Abbildung 44: Brett einer Holz100 Thermo Wand (e.A.). 64
Abbildung 45: Holz100 (A, B, C, D, E) und Holz100 Thermo (D, E) Wandsysteme (ohne Dämmung). Legende: v = vertikale Brettschicht, h = horizontale Brettschicht, d = diagonale Brettschicht, m = Mittellage (vertikal) (e.A.). 65
Abbildung 46: Holz100 Deckenelemente. Legende: v = vertikale Brettschicht, h = horizontale Brettschicht, d = diagonale Brettschicht (e.A.). 66
Abbildung 47: Holz100 Dachelemente. Legende: v = vertikale Brettschicht, h = horizontale Brettschicht, d = diagonale Brettschicht, m = Mittellage (e.A.).. 66
Abbildung 48: Wood-Mega-Therm Element (e.A.). 68
Abbildung 49: Wandaufbau Wood-Mega-Therm (e.A.). 68

Abbildung 50: Deckenaufbau Wood-Mega-Therm (e.A.)..... 69
Abbildung 51: Periodischer Wärmedurchgang (Temperaturamplitudendämpfung und Phasenverschiebung) (Zürcher und Frank 1998)..... 76
Abbildung 52: Definition der Eindringtiefe (Zürcher und Frank 1998)..... 78
Abbildung 53: Raummodell (Angaben in [m]) (e.A.)..... 81
Abbildung 54: Stahlbetonbauweise – Außenwand (AW_M), Innenwand (IW_M) und Geschoßdecke (GD_M); Anmerkung: Bei den Wänden ist die Raumzugewandte Seite rechts (*Waltjen et al. 2008). AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _M = Stahlbetonbauweise..... 82
Abbildung 55: Holzleichtbauweise - Außenwand, Innenwand und Geschoßdecke; Anmerkung: Bei den Wänden ist die Raumzugewandte Seite rechts (Waltjen et al. 2008) AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _L = Holzleichtbauweise..... 84
Abbildung 56: Holzmassivbauweise – Außenwand, Innenwand und Geschoßdecke Anmerkung: Bei den Wänden ist die Raumzugewandte Seite rechts (*Waltjen et al. 2008) AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _H = Holzmassivbauweise..... 85
Abbildung 57: Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschalen – Außenwand, Innenwand und Geschoßdecke. Anmerkung: Bei den Wänden ist die raumzugewandte Seite rechts (e.A. nach Waltjen et al. 2008). AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale..... 86
Abbildung 58: Holzleichtbauweise mit Vorsatzschalen – Außenwand, Innenwand und Geschoßdecke. Anmerkung: Bei den Wänden ist die raumzugewandte Seite rechts (e.A. nach Waltjen et al. 2008). AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale..... 87
Abbildung 59: Holzmassivbauweise mit Vorsatzschalen – Außenwand, Innenwand und Geschoßdecke. Anmerkung: Bei den Wänden ist die raumzugewandte Seite rechts (e.A. nach Waltjen et al. 2008). AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale..... 87
Abbildung 60: Verschattung mit Vorsprung (Angaben in [m]) (e.A.)..... 89
Abbildung 61: Stahlbeton-, Leichtbau- und Massivholzbau ohne Verschattung und ohne Ventilation (e.A.). Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _M = Stahlbetonbauweise, _L = Holzleichtbauweise, _H = Holzmassivbauweise, (oV) = ohne Verschattung..... 91
Abbildung 62: Stahlbeton-, Leichtbau- und Massivholzbau mit Vorsatzschalen; ohne Verschattung und ohne Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale,

_LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale, _HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung 92
Abbildung 63: Eingeschwungener Zustand, Temperatur, ohne Verschattung, ohne Ventilation (e.A.) M = Stahlbetonbauweise, L = Holzleichtbauweise, H = Holzmassivbauweise 93
Abbildung 64: Stahlbetonbau mit unterschiedlichen Verschattungsvarianten (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _M = Stahlbetonbauweise, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, (V) = Vorsprung..... 94
Abbildung 65: Holzleichtbau mit unterschiedlichen Verschattungsvarianten (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _L = Holzleichtbauweise, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, (V) = Vorsprung..... 95
Abbildung 66: Holzmassivbau mit unterschiedlichen Verschattungsvarianten (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _H = Holzmassivbauweise, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, (V) = Vorsprung..... 95
Abbildung 67: Stahlbetonbau mit Vorsatzschalen und unterschiedlichen Verschattungsvarianten (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, (V) = Vorsprung 96
Abbildung 68: Holzleichtbau mit Vorsatzschalen und unterschiedlichen Verschattungsvarianten (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, (V) = Vorsprung 97
Abbildung 69: Holzmassivbau mit Vorsatzschalen und unterschiedlichen Verschattungsvarianten (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, (V) = Vorsprung 97
Abbildung 70: Eingeschwungener Zustand, Temperatur mit Innenverschattung, ohne Ventilation (e.A.) M = Stahlbetonbauweise, L = Holzleichtbauweise, H = Holzmassivbauweise 98
Abbildung 71: Eingeschwungener Zustand, Temperatur mit Außenverschattung, ohne Ventilation (e.A.) M = Stahlbetonbauweise, L = Holzleichtbauweise, H = Holzmassivbauweise 99

Abbildung 72: Eingeschwungener Zustand, Temperatur mit Verschattung durch Vorsprung, ohne Ventilation (e.A.) M = Stahlbetonbauweise, L = Holzleichtbauweise, H = Holzmassivbauweise 99
Abbildung 73: Innen- und Außenjalousie, beide mit einem Verschattungsfaktor (f_c) von 0,5 (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _H = Holzmassivbauweise, (oV) = ohne Verschattung, (I) = Innenverschattung, (A) = Außenverschattung, fc = Verschattungsfaktor .. 101
Abbildung 74: Stahlbetonbau mit kontinuierlicher Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _M = Stahlbetonbauweise, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}..... 103
Abbildung 75: Holzleichtbau mit kontinuierlicher Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _L = Holzleichtbauweise, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1} 103
Abbildung 76: Holzmassivbau mit kontinuierlicher Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _H = Holzmassivbauweise, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}..... 104
Abbildung 77: Stahlbetonbau mit Vorsatzschale und kontinuierlicher Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}..... 105
Abbildung 78: Holzleichtbau mit Vorsatzschale und kontinuierlicher Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1}..... 106
Abbildung 79: Massivholzbau mit Vorsatzschale und kontinuierlicher Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag:

8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1} 106
Abbildung 80: Eingeschwungener Zustand, Temperatur in Abhängigkeit der Luftwechselrate [h^{-1}] bei kontinuierlicher Ventilation, ohne Vorsatzschalen, ohne Verschattung (e.A.) M = Stahlbetonbauweise, L = Holzleichtbauweise, H = Holzmassivbauweise 107
Abbildung 81: Eingeschwungener Zustand, Temperatur in Abhängigkeit der Luftwechselrate [h^{-1}] bei kontinuierlicher Ventilation, mit Vorsatzschalen, ohne Verschattung (e.A.) MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale, LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale, HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale 108
Abbildung 82: Stahlbetonbau mit tageszeitgesteuerter Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _M = Stahlbetonbauweise, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1} 109
Abbildung 83: Holzleichtbau mit tageszeitgesteuerter Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _L = Holzleichtbauweise, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1} 110
Abbildung 84: Holzmassivbau mit tageszeitgesteuerter Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _H = Holzmassivbauweise, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1} 110
Abbildung 85: Stahlbetonbau mit Vorsatzschale und tageszeitgesteuerter Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1} 111
Abbildung 86: Holzleichtbau mit Vorsatzschale und tageszeitgesteuerter Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1},

0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1} 112
Abbildung 87: Holzmassivbau mit Vorsatzschale und tageszeitgesteuerter Ventilation (e.A.) Ta = Außentemperatur, Ti = operative Innentemperatur, _HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale, (oV) = ohne Verschattung, T = Tag: 8:00-18:00 Uhr, N = Nacht: 18:00-8:00 Uhr, 0 = Luftwechselrate 0 h^{-1}, 0,5 = Luftwechselrate 0,5 h^{-1}, 1 = Luftwechselrate 1 h^{-1}, 2 = Luftwechselrate 2 h^{-1}, 5 = Luftwechselrate 5 h^{-1} 112
Abbildung 88: Eingeschwungener Zustand, Temperatur in Abhängigkeit der Luftwechselrate [h^{-1}] bei kontinuierlicher Ventilation, ohne Vorsatzschalen, ohne Verschattung (e.A.) M = Stahlbetonbauweise, L = Holzleichtbauweise, H = Holzmassivbauweise 113
Abbildung 89: Eingeschwungener Zustand, Temperatur in Abhängigkeit der Luftwechselrate [h^{-1}] bei kontinuierlicher Ventilation, mit Vorsatzschalen, ohne Verschattung (e.A.) MV = Stahlbetonbauweise mit Vorsatzschale, LV = Holzleichtbauweise mit Vorsatzschale, HV = Holzmassivbauweise mit Vorsatzschale 114
Abbildung 90: Spezifische Wärmekapazität von Holz in Abhängigkeit der Holzart/Rohdichte und der Holzfeuchte (e.A. nach Niemz 1993) 119
Abbildung 91: Loughborough-Diagramm - Hygroskopisches Gleichgewicht von Holz in Abhängigkeit der Temperatur und relativen Luftfeuchte (Niemz 1993). 120
Abbildung 92: Vertikal verschiebbare Fensterladen-Sonnenkollektoren in Wintertagstellung (5), Winternachtstellung (4) Sommertag- und Sonnenschutzstellung (6) (Treberspurg 1999). 122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über die Massivholzproduzenten und deren Produkteigenschaften 41
Tabelle 2: Naturi-Wandaufbau mit 30 cm Dicke 44
Tabelle 3: Wandaufbau mit Londyb Brettstapelelementen 48
Tabelle 4: Wandaufbau mit Brettstapelsystem der Firma Holzbau Berger 50
Tabelle 5: Wandaufbau Diagonal-Dübel-Bloc 52
Tabelle 6: Wandaufbau Diagonal-Dübel-Bloc-Iso 52
Tabelle 7: Wandaufbau mit dem Brettstapelsystem Nadelstreifholz 56
Tabelle 8: Wandaufbau mit dem Brettstapelsystem Nadelstreifholz und Dämmung 56
Tabelle 9: Typischer Wandaufbau „massive Naturholzwand“ 60
Tabelle 10: Übersicht über die angebotenen Brettsperrholzsystem 65
Tabelle 11: Wandaufbau Holz100 Wand Typ C 65
Tabelle 12: Wandaufbau Wood-Mega-Therm 69
Tabelle 13: Vergleich der Rohdichte und Wärmekapazität von Baustoffen (Hegger et al. 2008) 74
Tabelle 14: Wärmetechnische Kennwerte verschiedener Materialien (* nach Waltjen et al. 2008) 79
Tabelle 15: Kennwerte Raummodell 81
Tabelle 16: Kennwerte Fenster 81
Tabelle 17: Stahlbetonbauweise – Schichtaufbau (*Waltjen et al. 2008) Aufbau der Wände von innen nach außen, bei der Geschoßdecke von oben nach unten. 83
Tabelle 18: Holzleichtbauweise – Schichtaufbau (Waltjen et al. 2008) Aufbau der Wände von innen nach außen, bei der Geschoßdecke von oben nach unten. AW = Außenwand, IW = Innenwand, GD = Geschoßdecke, _L = Holzleichtbauweise 84
Tabelle 19: Holzmassivbauweise – Schichtaufbau (*Waltjen et al. 2008) Aufbau der Wände von innen nach außen, bei der Geschoßdecke von oben nach unten. 85
Tabelle 20: Vorsatzschalen – Schichtaufbau (Waltjen et al. 2008) Aufbau der Wände von innen nach außen, bei der Geschoßdecke von oben nach unten. 88
Tabelle 21: Erläuterung der Abkürzungsbezeichnungen 88
Tabelle 22: Übersicht über die Simulationen 90
Tabelle 23: Spezifische Wärmekapazität von Holz in unterschiedlichen bauphysikalischen Publikationen. 118

Tabelle 24: Spezifische Wärmekapazität von Holz in Abhängigkeit der Holzart/Rohdichte und der Holzfeuchte (Niemz 1993) 119
Tabelle 25: Ökologische Kennwerte von Metallen, Holz- und Holzwerkstoffen und anderen Baustoffen (Mötzl 2009) 140
Tabelle 26: Kennwerte Wandaufbauten TRNSYS ([1] Waltjen et al. 2008) 141
Tabelle 27: Numerische Ergebnisse - Auswertungen Boxplots - Verschattungen 143
Tabelle 28: Numerische Ergebnisse - Auswertungen Boxplots – kontinuierliche Ventilation 144
Tabelle 29: Numerische Ergebnisse - Auswertungen Boxplots – tageszeitgesteuerte Ventilation 145

Anhang

Anhang

A1 Ökologische Kennwerte

Tabelle 25: Ökologische Kennwerte von Metallen, Holz- und Holzwerkstoffen und anderen Baustoffen (Mötzl 2009)

		Dichte [kg/m³]	GWP [kg CO_2 eq/m³]	AP [g SO_2 eq/m³]	PEI ne [kWh/m³]
Metalle	Stahl hochlegiert (Legierungsanteil > 5%)	7800	39444	208586	174697
	Aluminiumblech	2800	16659	77873	66429
	Stahl niedriglegiert (Legierungsanteil <= 5% oder unlegiert und Mn >1%)	7800	10596	44531	49154
	Armierungsstahl	7800	9104	33491	42605
Holz und Holzwerkstoffe	MDF-Platte	780	-956	1988	3167
	Spanplatte V100 PF	680	-856	1292	2531
	OSB-Platte OSB 3 MUPF/PMDI	647	-747	1360	1684
	Brettschichtholz Standard	495	-614	1168	1112
	Schnittholz Fichte gehobelt, tech.trock.	500	-721	642	542
	Schnittholz Fichte sägerau, tech.trock.	500	-752	472	379
	Schnittholz Fichte sägerau, luftgetrock.	540	-760	341	282
	Schnittholz Fichte sägerau, tech.trock.	500	-752	472	379
Baustoffe	Ziegel - Hochlochziegel 800 kg/m³	800	144	409	561
	Polystyrol EPS F (für Fassade)	18	44	277	257
	Gipsfaserplatte	1180	158	462	848
	Normalbeton Klasse 2, Transport gemittelt	2300	272	510	552
	Stahlbeton mit 60 kg/m³ Armierungsanteil	2400	334	691	710

A2 Parameter der TRNSYS Simulation

Tabelle 26: Kennwerte Wandaufbauten TRNSYS ([1] Waltjen et al. 2008)

			Schicht-dicke d [m]	Wärme-leitfähigkeit[1] λ [W/(m K)]	Wärme-kapazität[1] c_p [kJ/(kg K)]	Roh-dichte[1] ρ [kg/m³]	Wärme-widerstand R [(m² K)/W]
Stahlbetonbauweise							
Außen-wand	1	Innenputz	0,001	0,4	1	1200	
	2	Stahlbeton	0,18	2,3	1,12	2400	
	3	XPS	0,32	0,4	1,45	38	
	4	Außenputz	0,005	0,8	1,13	1800	
Innen-wand	1	Innenputz	0,001	0,4	1	1200	
	2	Stahlbeton	0,18	2,3	1,12	2400	
	3	Innenputz	0,001	0,4	1	1200	
Geschoss-decke	1	Fertigparkett	0,01	0,17	2	740	
	2	Estrich	0,06	1,4	1,08	2000	
	3	XPS	0,04	0,4	1,45	38	
	4	Stahlbeton	0,2	2,3	1,12	2400	
Holzleichtbauweise							
Außen-wand	1	Gipskartonplatte	0,03	0,21	1,05	850	
	2	Mineralwolle MW W	0,1	0,04	1,03	20	
	3	OSB Platte	0,018	0,13	2	660	
	4	Mineralwolle MW W	0,28	0,04	1,03	20	
Innen-wand	1	Gipskartonplatte	0,025	0,21	1,05	850	
	2	Mineralwolle MW W	0,1	0,04	1,03	20	
	3	Gipskartonplatte	0,025	0,21	1,05	850	
	4	Mineralwolle MW W	0,04	0,04	1,03	20	
	5	Gipskartonplatte	0,025	0,21	1,05	850	
	6	Mineralwolle MW W	0,1	0,04	1,03	20	
	7	Gipskartonplatte	0,025	0,21	1,05	850	
Geschoss-decke	1	Fertigparkett	0,01	0,17	2	740	
	2	Estrich	0,05	1,4	1,08	2000	
	3	Mineralw. MW PT	0,03	0,04	1,03	130	
	4	Splitt	0,05	0,7	1	1600	
	5	OSB Platte	0,022	0,13	2	660	
	6	Luft	0,14				0,77778
	7	Mineralwolle MW W	0,08	0,04	1,03	20	
	8	OSB Platte	0,022	0,13	2	660	
	9	Luft	0,01				0,066672
	10	Mineralwolle MW W	0,04	0,04	1,03	20	
	11	Gipskartonplatte	0,03	0,21	1,05	850	

			Schicht-dicke d [m]	Wärme-leitfähigkeit[1] λ [W/mK]	Wärme-kapazität[1] c_p [kJ/(kgK)]	Roh-dichte[1] ρ [kg/m³]	Wärme-widerstand R [(m² K)/W]
Holzmassivbauweise							
Außen-wand	1	Brettstapel gedübelt	0,12	0,15	2	500	
	2	Mineralwolle MW W	0,3	0,04	1,03	20	
	3	DWD-Platte	0,016	0,08	2	780	
Innen-wand	1	Brettstapel gedübelt	0,12	0,15	2	500	
	2	Mineralwolle MW W	0,04	0,04	1,03	20	
	3	Luft	0,02				0,088236
	4	Gipskartonplatte	0,015	0,21	1,05	850	
Geschoss-decke	1	Fertigparkett	0,01	0,17	2	740	
	2	Estrich	0,05	1,4	1,08	2000	
	3	Mineralw. MW PT	0,03	0,04	1,03	130	
	4	Splitt	0,05	0,7	1	1600	
	5	Brettstapel gedübelt	0,16	0,15	2	500	
	6	Luft	0,01				0,066672
	7	Mineralwolle MW W	0,04	0,04	1,03	20	
	8	Gipskartonplatte	0,03	0,21	1,05	850	
Vorsatzschalen							
Installations-ebene Wand	1	Gipskartonplatte	0,015	0,21	1,05	850	
	2	Luft	0,02				0,088236
	3	Mineralwolle MW W	0,04	0,04	1,03	20	
Distanz-boden	2	OSB Platte	0,032	0,13	2	660	
	3	Mineralwolle MW W	0,08	0,04	1,03	20	
Abgehängte Decke	n+1	Luft	0,01				0,066672
	n+2	Mineralwolle MW W	0,04	0,04	1,03	20	
	n+3	Gipskartonplatte	0,03	0,21	1,05	850	

- Der konvektive Wärmeübergang zur Wand wurde an den Wandinnenseiten standardmäßig mit 3 W/(m² K) angenommen, an den Wandaußenseiten mit 18 W/(m² K) und bei hinterlüfteten Fassaden mit 5,6 W/(m² K).
- Für die Raumluft wurde eine Wärmekapazität von 81 kJ/K angenommen.
- Die Außenwand und das Fenster stehen in einen Strahlungsaustausch mit dem Nachthimmel zu 50%.
- Die Albedo der umgebenden Grundfläche beträgt 0,2.

- Des Weiteren wurde angenommen, dass 70 % der einfallenden Solarstrahlung auf den Boden treffen, die restlichen 30 % werden zu gleichen Teilen von den anderen Flächen im Raum absorbiert.

A3 Numerische Ergebnisse der statistischen Auswertung (Boxplots)

Tabelle 27: Numerische Ergebnisse - Auswertungen Boxplots - Verschattungen

Ohne Verschattung	**Ti_M_EZ(oV) [°C]**	**Ti_L_EZ(oV) [°C]**	**Ti_H_EZ(oV) [°C]**	**Ti_MV_EZ(oV) [°C]**	**Ti_LV_EZ(oV) [°C]**	**Ti_HV_EZ(oV) [°C]**
Max	49,4	50,3	49,6	51,9	51,4	51,2
75% Quantil	49,1	49,4	48,8	50,7	50,2	50,0
Median	48,9	48,5	48,2	49,5	49,2	48,8
25% Quantil	48,8	48,0	47,9	48,9	48,4	48,2
Min	48,7	47,6	47,6	48,5	47,9	47,7
Mittelwert	48,9	48,7	48,4	49,8	49,4	49,1
Amplitude	0,8	2,7	2,0	3,5	3,5	3,5

Innenverschattung	**Ti_M_EZ (I) [°C]**	**Ti_L_EZ (I) [°C]**	**Ti_H_EZ (I) [°C]**	**Ti_MV_EZ (I) [°C]**	**Ti_LV_EZ (I) [°C]**	**Ti_HV_EZ (I) [°C]**
Max	48,2	49,4	48,6	50,6	50,4	50,2
75% Quantil	47,8	48,4	47,8	49,3	49,2	48,9
Median	47,6	47,6	47,2	48,2	48,1	47,8
25% Quantil	47,5	47,1	46,9	47,6	47,4	47,1
Min	47,4	46,6	46,6	47,2	46,9	46,6
Mittelwert	47,7	47,7	47,4	48,5	48,3	48,0
Amplitude	0,8	2,7	2,0	3,4	3,5	3,5

Außenverschattung	**Ti_M_EZ (A) [°C]**	**Ti_L_EZ (A) [°C]**	**Ti_H_EZ (A) [°C]**	**Ti_MV_EZ (A) [°C]**	**Ti_LV_EZ(A) [°C]**	**Ti_HV_EZ (A) [°C]**
Max	29,8	29,9	29,8	29,8	29,9	29,8
75% Quantil	29,5	29,6	29,5	29,5	29,6	29,5
Median	29,1	29,2	29,1	29,1	29,2	29,1
25% Quantil	28,8	29,0	28,8	28,8	29,0	28,8
Min	28,6	28,7	28,6	28,6	28,7	28,6
Mittelwert	29,2	29,3	29,2	29,2	29,3	29,2
Amplitude	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

Vorsprung	**Ti_M_EZ (V) [°C]**	**Ti_L_EZ (V) [°C]**	**Ti_H_EZ (V) [°C]**	**Ti_MV_EZ (V) [°C]**	**Ti_LV_EZ (V) [°C]**	**Ti_HV_EZ (V) [°C]**
Max	34,1	34,7	34,3	35,1	35,1	34,9
75% Quantil	34,0	34,5	34,1	34,9	34,8	34,7
Median	33,9	34,1	33,8	34,3	34,4	34,2
25% Quantil	33,8	33,9	33,7	34,1	34,1	33,9
Min	33,8	33,6	33,5	33,8	33,7	33,5
Mittelwert	33,9	34,2	33,9	34,5	34,4	34,2
Amplitude	0,3	1,1	0,8	1,4	1,4	1,4

Tabelle 28: Numerische Ergebnisse - Auswertungen Boxplots – kontinuierliche Ventilation

		Max	75% Quantil	Median	25% Quantil	Min	Mittelwert	Amplitude
Ti_M (oV) T=N=0	**[°C]**	49,4	49,1	48,9	48,8	48,7	48,9	0,8
Ti_L (oV) T=N=0	**[°C]**	50,3	49,4	48,5	48,0	47,6	48,7	2,7
Ti_H (oV) T=N=0	**[°C]**	49,6	48,8	48,2	47,9	47,6	48,4	2,0
Ti_M (oV) T=N=0,5	**[°C]**	32,1	31,8	31,4	31,1	30,9	31,5	1,2
Ti_L (oV) T=N=0.5	**[°C]**	33,4	32,5	31,4	30,7	30,1	31,6	3,3
Ti_H (oV) T=N=0.5	**[°C]**	32,9	32,2	31,3	30,8	30,4	31,5	2,6
Ti_M (oV) T=N=1	**[°C]**	29,1	28,7	28,1	27,8	27,6	28,3	1,5
Ti_L (oV) T=N=1	**[°C]**	30,3	29,5	28,0	27,3	26,5	28,3	3,8
Ti_H (oV) T=N=1	**[°C]**	29,9	29,1	28,0	27,4	26,8	28,2	3,0
Ti_M (oV) T=N=2	**[°C]**	27,1	26,8	25,9	25,4	25,1	26,1	2,1
Ti_L (oV) T=N=2	**[°C]**	28,4	27,7	25,8	24,8	23,8	26,1	4,6
Ti_H (oV) T=N=2	**[°C]**	28,0	27,3	25,8	25,0	24,2	26,1	3,8
Ti_M (oV) T=N=5	**[°C]**	26,1	25,7	24,3	23,4	22,8	24,5	3,3
Ti_L (oV) T=N=5	**[°C]**	27,6	26,9	24,2	22,6	21,2	24,5	6,4
Ti_H (oV) T=N=5	**[°C]**	27,1	26,5	24,1	22,8	21,7	24,5	5,4
Ti_MV (oV) T=N=0	**[°C]**	51,9	50,7	49,5	48,9	48,5	49,8	3,5
Ti_LV (oV) T=N=0	**[°C]**	51,4	50,2	49,2	48,4	47,9	49,4	3,5
Ti_HV (oV) T=N=0	**[°C]**	51,2	50,0	48,8	48,2	47,7	49,1	3,5
Ti_MV (oV) T=N=0,5	**[°C]**	33,8	32,6	31,2	30,4	29,7	31,5	4,2
Ti_LV (oV) T=N=0,5	**[°C]**	34,0	32,8	31,4	30,5	29,7	31,6	4,2
Ti_HV (oV) T=N=0,5	**[°C]**	33,9	32,7	31,3	30,4	29,7	31,6	4,2
Ti_MV (oV) T=N=1	**[°C]**	30,9	29,7	28,0	27,1	26,2	28,3	4,7
Ti_LV (oV) T=N=1	**[°C]**	30,8	29,8	28,0	27,0	26,1	28,3	4,8
Ti_HV (oV) T=N=1	**[°C]**	30,8	29,7	27,9	27,0	26,1	28,3	4,8
Ti_MV (oV) T=N=2	**[°C]**	29,0	28,0	25,8	24,5	23,4	26,1	5,6
Ti_LV (oV) T=N=2	**[°C]**	28,9	28,1	25,7	24,6	23,3	26,1	5,6
Ti_HV (oV) T=N=2	**[°C]**	29,0	28,0	25,8	24,5	23,3	26,1	5,7
Ti_MV (oV) T=N=5	**[°C]**	28,1	27,2	24,0	22,2	20,7	24,5	7,3
Ti_LV (oV) T=N=5	**[°C]**	28,0	27,3	24,1	22,3	20,7	24,5	7,4
Ti_HV (oV) T=N=5	**[°C]**	28,0	27,2	24,1	22,2	20,7	24,5	7,4

Tabelle 29: Numerische Ergebnisse - Auswertungen Boxplots – tageszeitgesteuerte Ventilation

		Max	75% Quantil	Median	25% Quantil	Min	Mittelwert	Amplitude
Ti_M (oV) T=N=0	**[°C]**	49,4	49,1	48,9	48,8	48,7	48,9	0,8
Ti_L (oV) T=N=0	**[°C]**	50,3	49,4	48,5	48,0	47,6	48,7	2,7
Ti_H (oV) T=N=0	**[°C]**	49,6	48,8	48,2	47,9	47,6	48,4	2,0
Ti_M (oV) T=0,5 N=1	**[°C]**	29,2	28,9	28,3	27,9	27,7	28,4	1,5
Ti_L (oV) T=0,5 N=1	**[°C]**	30,6	29,8	28,3	27,4	26,7	28,5	3,9
Ti_H (oV) T=0,5 N=1	**[°C]**	30,1	29,3	28,2	27,6	27,0	28,4	3,1
Ti_M (oV) T=0,5 N=2	**[°C]**	26,5	26,1	25,4	24,9	24,6	25,5	1,9
Ti_L (oV) T=0,5 N=2	**[°C]**	28,1	27,4	25,7	24,6	23,6	25,8	4,5
Ti_H (oV) T=0,5 N=2	**[°C]**	27,5	26,9	25,5	24,6	23,9	25,7	3,7
Ti_M (oV) T=0,5 N=5	**[°C]**	24,0	23,7	23,2	22,2	21,6	23,0	2,4
Ti_L (oV) T=0,5 N=5	**[°C]**	25,9	25,1	23,3	21,8	20,5	23,4	5,3
Ti_H (oV) T=0,5 N=5	**[°C]**	25,3	24,6	23,2	21,9	20,9	23,2	4,4
Ti_MV (oV) T=N=0	**[°C]**	51,9	50,7	49,5	48,9	48,5	49,8	3,5
Ti_LV (oV) T=N=0	**[°C]**	51,4	50,2	49,2	48,4	47,9	49,4	3,5
Ti_HV (oV) T=N=0	**[°C]**	51,2	50,0	48,8	48,2	47,7	49,1	3,5
Ti_MV (oV) T=0,5 N=1	**[°C]**	31,3	30,2	28,3	27,3	26,4	28,6	4,9
Ti_LV (oV) T=0,5 N=1	**[°C]**	31,2	30,2	28,3	27,2	26,3	28,6	4,9
Ti_HV (oV) T=0,5 N=1	**[°C]**	31,2	30,1	28,3	27,2	26,3	28,6	5,0
Ti_MV (oV) T=0,5 N=2	**[°C]**	29,0	27,9	25,7	24,4	23,3	26,0	5,6
Ti_LV (oV) T=0,5 N=2	**[°C]**	28,8	27,8	25,7	24,5	23,2	25,9	5,6
Ti_HV (oV) T=0,5 N=2	**[°C]**	28,9	27,8	25,7	24,4	23,2	25,9	5,7
Ti_MV (oV) T=0,5 N=5	**[°C]**	26,8	25,9	23,3	21,7	20,3	23,6	6,6
Ti_LV (oV) T=0,5 N=5	**[°C]**	26,7	25,7	23,4	21,7	20,2	23,6	6,5
Ti_HV (oV) T=0,5 N=5	**[°C]**	26,8	25,8	23,3	21,6	20,2	23,6	6,6