

# UNTERSUCHUNGEN ZU EINSATZMÖGLICHKEITEN VON HOLZLEICHTBETON IM BEREICH VON GEBÄUDEFASSADEN

LEHRSTUHL FÜR GEBÄUDETECHNOLOGIE • PROF. THOMAS HERZOG

ROLAND KRIPPNER



**DISSERTATION**

AUS DEM INSTITUT FÜR ENTWERFEN UND BAUTECHNIK  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN • FAKULTÄT FÜR ARCHITEKTUR





Technische Universität München  
Fakultät für Architektur  
Institut für Entwerfen und Bautechnik  
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie

**Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten von  
Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden**

Roland Krippner

Vollständiger Abdruck der von der  
Fakultät für Architektur der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen

Die Dissertation wurde am 08.03.2004 bei der  
Technischen Universität München eingereicht und durch die  
Fakultät für Architektur am 21.04.2004 angenommen.



Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Freunde und Kollegen, Projektpartner und Firmenmitarbeiter in unterschiedlicher Art und Weise beigetragen. Bei allen möchte ich mich herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Professor Dr. (Univ. Rom) Thomas Herzog für seine Bereitschaft die Arbeit in Form des Hauptreferates zu betreuen, sowie für deren fachliche Begleitung, und die vielfältige Unterstützung in der Durchführung. Darüber hinaus für die Möglichkeiten, im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter/Assistent am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie eine Vielzahl interessanter Themen und Projekte bearbeiten zu können

Herrn Professor Dr.-Ing. Gerhard Hausladen vor allem für seine Bereitschaft, in der Schlussphase der Arbeit, das Korreferat zu übernehmen.

Herrn Professor Dipl.-Ing. Julius Natterer, der durch seine Anregung zum Thema, die Arbeit erst ermöglichte.

Herrn Dr.-Ing. Helge Hartwig der auch nach seinem Ausscheiden am Lehrstuhl mit vielen anregenden Diskussionen sowie der gründlichen und kritischen Durchsicht die Arbeit unterstützt hat.

Herrn Robert Rieger, Leiter der Metallwerkstatt, der bei Vorbereitung und Durchführung der Versuchsarbeiten eine stete und wichtige Hilfe war.

Bei folgenden Personen und Institutionen möchte ich mich für ihre wertvolle Unterstützung bedanken:

Herrn Dr. Jochen Manara, ZAE Bayern/Abt. 2, Würzburg; Herrn Zdenek Hacker, Herrn Christian Oberdorf (ehemals), Herrn Stefan Winkelmüller, ZAE Bayern/Abt. 4, Garching; Herrn Dr. Harald Mehling, ZAE Bayern/Abt. 1, Garching

Herrn Michael Roider, IEZ Natterer GmbH, Sauburg/ Wiesenfelden

Herrn Andreas Greubel, Frau Nicole Hribar, Herrn Peter Krauß, Materialprüfungsamt für das Bauwesen (MPA Bau) der Technischen Universität München

Herrn Dr.-Ing. Bernhard Kling, ehemals Baubereitung Zement Bayern, München

Herrn Peter Hainzinger, Holzforschung München, Technische Universität München

Herrn Walter Thurmayr, 85669 Reithofen

Auch folgenden Firmen und Ihren Mitarbeitern, die mit ihrer Unterstützung die Durchführung der experimentellen Arbeiten ermöglichten, gilt mein Dank:

Herrn Dr.-Ing. Klaus Fieback, Fa. *RUBITHERM*, Fürstenwalde

Herrn Dirk Rogge, Herrn Dr. Holger Kindermann, Fa. Odenwald Faserplattenwerk, Amorbach

Herrn Stefan Heeß, Fa. Dyckerhoff Weiss; Herrn Thomas Sievert, Wilhelm Dyckerhoff Institut für Baustofftechnologie, Wiesbaden

Herrn Siegfried Delzer, DELZER-Kybernetik, Lörach

Herrn Dr. Peter Weber, Fa. Harold Scholz Chemische Fabrik, Lohr am Main

Frau Dr. Franziska Hildebrandt – wie so oft – für das sorgfältige Korrektorat

Roland Krippner, München März 2004

Der Autor bedankt sich bei der  
Werner Konrad Marschall und  
Dr.-Ing. Horst Karl Marschall-Stiftung  
für die wertvolle finanzielle Unterstützung  
zur Drucklegung der Arbeit

<b>Kurzfassung</b>	<b>7</b>
<b>1 Vorbemerkungen</b>	<b>9</b>
<b>2 Methodisches Vorgehen</b>	<b>11</b>
2.1 Zielsetzung und struktureller Aufbau der Arbeit	11
2.2 Aktueller Wissensstand – Forschungsaktivitäten	13
2.2.1 Betontechnologie	13
2.2.2 Zement gebundene Holzwerkstoffe	14
2.2.3 Latentwärmespeichermaterialien	16
2.3 Abgrenzung der Arbeitsschritte	17
<b>3 Holzleichtbeton</b>	<b>19</b>
3.1 Begriffsbestimmung	19
3.2 Ausgangsstoff Holz	21
3.2.1 Eigenschaften von Holz	21
3.2.2 Holz als Zuschlagsstoff	22
3.3 Ausgangsstoff Zement/Beton	23
3.3.2 Beton	24
3.3.3 Leichtbeton	26
<b>4 Vom Steinholz zum Holzleichtbeton</b>	<b>29</b>
4.1 Anfänge – Frühe Experimente	29
4.1.1 Steinartige Masse aus Sägemehl und Gips oder Zement	30
4.1.2 Baumaterial aus Gips und Sägespänen	30
4.1.3 Kunststeinplatten aus Magnesit	30
4.2 Steinholz	31
4.2.1 Magnesia-Estrich	31
4.2.2 Steinholz oder Xylolith	31
4.3 Holzbeton	33
4.3.1 Stand der Forschung um 1950	33
4.3.2 Forschungsarbeiten in der DDR	35
4.4 Aktuelle Produkte und Systeme	38
4.4.1 Holzspanbeton	38
4.4.2 Holzwolleleichtbauplatte	39
4.5 Zusammenfassung	41

<b>5 Holzleichtbeton als Material für thermisch passive Bauteile</b>	<b>43</b>
5.1 Untersuchungssystematik	43
5.2 Baukonstruktive Eigenschaften	45
5.2.1 Restholzsortiment	45
5.2.2 Zementgehalt	46
5.2.3 Herstellung von Holzleichtbeton	46
5.2.4 Festigkeitseigenschaften	47
5.3 Bauphysikalische Eigenschaften	49
5.3.1 Ausgangsrezepturen	49
5.3.2 Wärmeschutz	49
5.3.3 Feuchteschutz	52
5.3.4 Schallschutz	53
5.3.5 Brandschutz	53
5.4 Charakterisierung unterschiedlicher Wandaufbauten	54
5.4.1 Ausgewählte Parameter	55
5.4.2 Thermische Gebäudesimulation	56
5.5 Zusammenfassung	58
<b>6 Holzleichtbeton als Material für thermisch aktive Bauteile</b>	<b>61</b>
6.1 Stand der Entwicklung von Massivabsorbieren	61
6.1.1 Bauphysikalische Einflussgrößen und lokale Randbedingungen	62
6.1.2 Betonbauteile als thermisch aktives System	64
6.1.3 Fazit	66
6.2 Thermisch aktive Bauteile aus Holzleichtbeton	67
6.3 Bau von Funktionsmodellen	69
6.3.1 Versuchsrahmen	69
6.3.2 Herstellung der Holzleichtbeton-Funktionsmodelle	69
6.4 Vermessung der Funktionsmodelle	71
6.4.1 Der experimentelle Aufbau	71
6.4.2 Durchführung der Vermessung	72
6.4.3 Messergebnisse	72
6.5 Potenzialabschätzung	75
6.5.1 Simulationskonzept	75
6.5.2 Parameterbestimmung	75
6.5.3 Ergebnisse und Bilanzierung	76

Inhalt	<b>7</b>	<b>Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien</b>	<b>79</b>	7.9.4	Beschreibung der untersuchten Simulationsvarianten	131
	7.1	Thermische Behaglichkeit und Heizwärmebedarf von Räumen	79	7.9.5	Untersuchungsergebnisse	133
	7.2	Holzleichtbeton und PCM	81	7.9.6	Fazit	135
	7.3	Latentwärmespeichermaterialien	82	7.10	Zusammenfassung	137
	7.3.1	Latente Wärme-/Kältespeicherung	82	7.10.1	Oberflächen	137
	7.3.2	PCM in Gebäuden	83	7.10.2	Optimierungen	137
	7.3.3	Paraffine	84	7.10.3	PCM-Material	138
	7.3.4	Anwendungsmöglichkeiten	85	<b>8</b>	<b>Außenwandkonstruktionen mit Holzleichtbeton</b>	<b>143</b>
	7.4	Herstellung erster Funktionsmodelle	86	8.1	Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise	144
	7.4.1	Bau von Schalungen	86	8.1.1	Brettstapel	144
	7.4.2	Vorarbeiten und Ausgangsstoffe	88	8.1.2	Beton für Außenbauteile	146
	7.4.3	Herstellung erster Mischungen (Betonage 1)	90	8.2	Farbige und strukturierte Oberflächen	147
	7.4.4	Messergebnisse	93	8.2.1	Farbmuster (Betonage 3)	147
	7.4.5	Messreihen zum Masseverlust	94	8.2.2	Strukturschalungen (Betonage 4)	149
	7.4.6	Oberflächen und Zwischenfazit	94	8.2.3	Einsatz von Fließmitteln	152
	7.5	Optimierung der Mischungen	96	8.2.4	Herstellung der modifizierten Mischungen (Betonage 5)	154
	7.5.1	Aufstellen neuer Rezepturen	96	8.2.5	Fazit	156
	7.5.2	Herstellung der optimierten Mischungen (Betonage 2)	100	8.3	Wandaufbauten	156
	7.6	Baukonstruktive Eigenschaften	103	8.4	Zusammenfassung	160
	7.6.1	Druckfestigkeit	104	<b>9</b>	<b>Schlussbemerkungen – Ausblick</b>	<b>163</b>
	7.6.2	E-Modul und Biegezugfestigkeit	107	<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>165</b>
	7.7	Bauphysikalische Eigenschaften	108	10.1	Literaturverzeichnis	165
	7.7.1	Wärmeleitfähigkeit	109	10.2	Eigene Veröffentlichungen im Rahmen der Dissertation	169
	7.7.2	Wärmespeicherkapazität und Schmelzenthalpie	110	10.3	Abbildungsnachweis	169
	7.7.3	Messungen mit dem Sonnensimulator	112	10.4	Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten	170
	7.8	Ergänzende Untersuchungen	115	10.5	Rezepturen	171
	7.8.1	Schwind-Messungen	115	10.5.0	Stoffraumberechnung	172
	7.8.2	Luftporengehalt	117	10.5.1	Betonage 1 (06.09.2001)	173
	7.8.3	Frost-Tau-Wechselbeständigkeit	119	10.5.2	Betonage 2 (13./16.05.2002)	180
	7.8.4	Brandversuche	121	10.5.3	Betonage 3 (10.01.2003)	196
	7.8.5	Untersuchungen zum Feuchteausgleichsverhalten	124	10.5.4	Betonage 4 (03.07.2003)	200
	7.9	Potenzialabschätzung	128	10.5.5	Betonage 5 (16.07.2003)	203
	7.9.1	Einflüsse sommerlicher Überhitzung	128			
	7.9.2	Beschreibung des Beispielraums	129			
	7.9.3	Einflüsse der Bauweise auf die Wärmespeicherfähigkeit des Raums	130			



In der Arbeit wird Holzleichtbeton, ein Verbundwerkstoff, der sich aus Zement, Sägespänen beziehungsweise -mehl, Wasser und Additiven zusammensetzt, hinsichtlich der Eignung als Material für thermisch passive und thermisch aktive Bauteile untersucht.

Holzleichtbeton (HLB) ist aufgrund der Rohdichte zu den Leichtbetonen zu zählen. Je nach Mischungsverhältnis lassen sich Rohdichten von 400 bis 1700 kg/m<sup>3</sup> herstellen. Gute Verarbeitung und variierbare Wärme-, Schall- und Festigkeitseigenschaften kennzeichnen das Material.

In sechs unterschiedlichen Aufbauten wurde Holzleichtbeton als Material für Massivabsorber getestet. Die Ergebnisse der Vermessung und eine durchgeführte Potentialabschätzung zeigen, dass die Leistungsfähigkeit der untersuchten thermisch aktiven Bauteile eingeschränkt ist.

Den Schwerpunkt der Arbeit stellten Untersuchungen zur Kombination von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien (PCM) dar. Der Verbund von organischen PCM mit anorganischen Bindemitteln und Holz als Zuschlagsstoff wurde bisher noch nicht untersucht.

Mit der Aufstellung und Erprobung unterschiedlicher Rezepturen wurden im Rahmen der Arbeiten zum Teil erstmalig sowohl materialspezifische als auch experimentelle Versuche durchgeführt, Potentialabschätzungen vorgenommen und Funktionsmodelle in unterschiedlichen Maßstäben hergestellt.

In insgesamt fünf verschiedenen Arbeitsschritten erfolgten umfangreiche Versuchs- und Testreihen an unterschiedlichen Mischungen. Die erreichten Rohdichten der Funktionsmodelle liegen etwa zwischen 1000 und 1450 kg/m<sup>3</sup>. Untersuchungen zur Druckfestigkeit lassen höhere Festigkeitswerte wie bei 'normalem' Holzleichtbeton erkennen.

Darüber hinaus zeigen vor allem die Ergebnisse der E-Modul-Messungen, dass die Mischungen einen sehr homogenen Aufbau aufweisen.

Erste Versuche zur Feuerwiderstandsdauer in einem Kleinbrandofen und ein Brandschachttest ergaben ausreichende Brandschutzeigenschaften. Anhand von Frost-Tau-Wechsel-Prüfungen zeigt sich die sehr gute Dauerhaftigkeit und hohe Witterungsbeständigkeit von Holzleichtbeton.

Ebenfalls ermittelte bauphysikalische Kenngrößen zu Wärmeleitfähigkeit, Wärmespeicherkapazität und zum Feuchteausgleichsverhalten zeigen, dass sich das Material sowohl für Anwendungen im Außenbereich als auch im Innenraum eignet.

Die Kombination von HLB mit PCM weist somit weitere funktionale und baukonstruktive Vorteile auf, die leichtere und dünnere Wandelemente bei gleichzeitig thermodynamisch besseren Stoffeigenschaften ermöglichen. Darüber hinaus erfolgten im Zusammenhang mit der Erarbeitung von Grundlagen für Konstruktionen und Schichtenfolgen von Außenwänden in der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise Untersuchungen zu den gestalterischen Potenzialen des Verbundwerkstoffs. Diese konnten exemplarisch an Farbmusterreihen sowie Funktionsmodellen mit strukturierten, plastischen Oberflächen aufgezeigt werden.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass Verbundwerkstoffe aus Holz und anorganischen Bindemitteln eine Reihe interessanter Optionen vor allem im Bereich des Ressourcen schonenden Bauens aufweisen. Holzleichtbeton ist ein zukunftsweisendes und leistungsfähiges Material, das aufgrund der positiven Materialeigenschaften für den Einsatz im Mehrgeschossbau sowie im Fertigteilbau oder Innenausbau geeignet ist.



Holzleichtbeton ist ein Verbundwerkstoff, der sich aus Zement, Sägespänen beziehungsweise Sägemehl, Wasser und Additiven zusammensetzt. Die Kombination von anorganischen Baurohstoffen mit Restholz aus der Holzbearbeitung ist keine Neuentwicklung, sondern reicht bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts zurück. Unter Bezeichnungen wie "Steinholz", "Sägemehlbeton" oder "Holzbeton" existieren eine Reihe von Anwendungen, vor allem als Fußbodenestriche und Putze. Anfang der 1930er Jahre werden mit der Patentierung von einschlägigen Verfahren die Grundlagen zur Herstellung von "Holzspanbeton" geschaffen und nach dem Zweiten Weltkrieg experimentiert man aufgrund von Rohstoffmangel mit zementgebundenen Holzwerkstoffen. Ende der 60er Jahre wird in der Deutschen Demokratischen Republik dieser Ansatz zeitweise wieder aufgegriffen. Seit einigen Jahren beschäftigt man sich aufgrund von Ressourcenverknappung (Sand, Kies) und Gewichtersparnis (Wand- und Deckenkonstruktionen) wieder eingehend mit diesen Konzepten die unter derzeitigen technologischen Möglichkeiten fortgeführt werden.

Durch seine materialspezifischen und raumklimatischen Eigenschaften ist Holz für ein ökologisches und nachhaltiges Bauen hervorragend geeignet. Auch der Holzleichtbeton weist als Verbundwerkstoff eine Reihe dieser Merkmale auf. Bei der Holzbearbeitung fallen Hobelspäne und Sägemehl in großen Mengen als Abfall- und Restprodukt an und können mit Zement und Wasser einer sinnvollen Weiterverarbeitung zugeführt werden. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass Holzleichtbeton eine Reihe interessanter Optionen vor allem im Bereich des Ressourcen schonenden Bauens aufweist. Daher ist es vordergründiges Ziel der Arbeit, aufbauend auf vorhandene Grundlagen die Kenntnisse

von wesentlichen Parametern der Materialeigenschaften zu erweitern sowie die Einsatzmöglichkeiten insbesondere im Bereich der Gebäudefassaden zu untersuchen. Darüber hinaus sollen Einsichten in das enorme Potenzial der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise gewonnen sowie Untersuchungen zur Klärung von Grunddetails für die Anwendung im allgemeinen Hochbau durchgeführt werden. Dabei haben sich bei der Durchführung der Arbeiten (leichte) Akzentverschiebungen gegenüber der ursprünglichen Aufgabenstellung ergeben. Die Untersuchungen zu der neuartigen Kombination von Holzleichtbetonmischungen mit organischen Latentwärmespeichermaterialien (PCM) zeigen eine derart große Fülle an Optionen, dass die materialspezifischen Untersuchungen den Schwerpunkt der Arbeit bilden.

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen einer Kooperation des Lehrstuhls für Gebäudetechnologie von Prof. Thomas Herzog an der Technischen Universität München mit dem Bayerischen Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern), Würzburg/Garching. Ziel der Kooperation ist eine anwendungsbezogene Forschung im Bereich der gebäudenahen Nutzung von Erneuerbaren Energien. Neben der Einbindung in zwei großen Projektvorhaben<sup>1</sup> ermöglichte diese Zusammenarbeit die Durchführung von so genannten "Verbundprojekt(en) ZAE Bayern", die jährlich vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie – Innovationsberatungsstelle Südbayern –, unter Beteiligung (regionaler) Industriepartner, gefördert wurden.

Durch dieses Modell einer institutionell verabredeten, interdisziplinären Forschungs- und

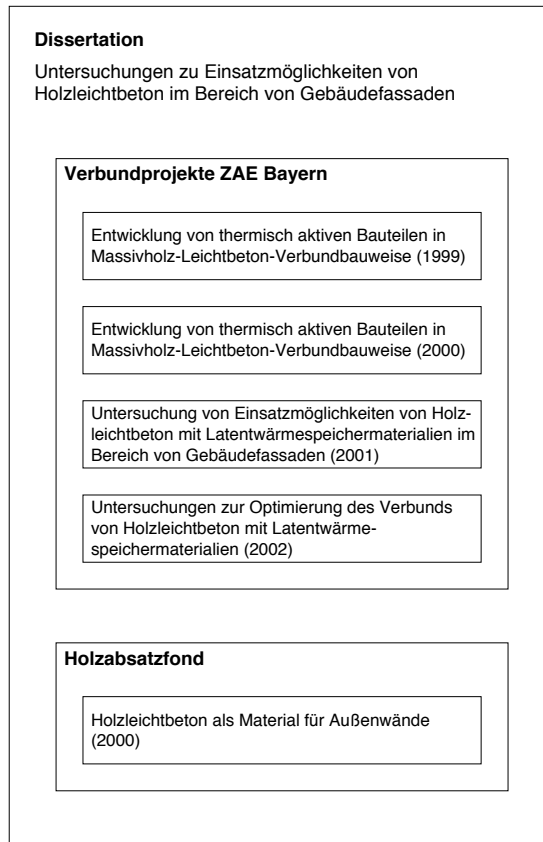


Abb. 1.1 Dissertation und parallel laufende Forschungsprojekte am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie der TU München

Entwicklungsarbeit im Verbund mit Unternehmen aus der Bauwirtschaft, war es überhaupt erst mit relativ kleinen Projektvolumina<sup>2</sup> möglich, gleichermaßen konzeptionelle und experimentelle Untersuchungen mit einer Vielzahl (aufwendiger) Prüfungs- und Simulationsarbeiten durchzuführen.

Darüber hinaus boten die unterschiedlichen Werkstätten des Technischen Zentrums der Fakultät für Architektur, eingebettet in das In-

stitut für Entwerfen und Bautechnik, – für Architekten immer noch nicht selbstverständliche – hervorragende Bedingungen für experimentelles Arbeiten.<sup>3</sup> Diese guten Ausgangsbedingungen wurden noch durch die räumliche Nähe des Materialprüfungsamtes für das Bauwesen (MPA Bau) der Technischen Universität München ergänzt.

Den Ausgangspunkt der Arbeiten bilden die Untersuchungen von Prof. Julius Natterer an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne (I-Bois, Institut für Holzkonstruktionen) zum "Holzleichtbeton", der auch eine Vertiefung und Erweiterung des Themas anregte.

Somit konnte ab dem Frühjahr 1999 im Zuge der genannten Verbundprojekte am Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, in Kooperation mit dem ZAE Bayern und dem IEZ - Internationales Entwicklungszentrum für Holzkonstruktionen Natterer GmbH, dieser Arbeitsschwerpunkt über mehrere Jahre etabliert werden. Neben der Förderung durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft Verkehr und Technologie, sowie durch die Bayern Zement – Gesellschaft für Absatzförderung und Marktforschung mbH (1999 und 2000), die Firmen RUBITHERM GmbH / Schümann SASOL GmbH & Co KG (2001) und Odenwald Faserplattenwerk GmbH (2002), unterstützte der Holzabsatzfond – Absatzförderungsfond der deutschen Forst- und Holzwirtschaft –, eine ergänzende Projektstudie. (Abb. 1.1)

Themenstellung und Inhalt der Dissertation spiegeln eine für Architekten eher ungewöhnliche wissenschaftliche Vertiefung wider. Wenn aber angesichts der gegenwärtigen gesellschaftlichen Herausforderungen die Arbeit an nachhaltigen baulichen Konzepten zu qualitativ neuen Lösungen führen soll, müssen sich auch Architekten verstärkt mit material-

spezifischen und technologischen Fragestellungen auseinandersetzen. Daher wird auch die Vielzahl unterschiedlicher Messverfahren und deren Apparatetechnik, die computergestützten Simulationen wie auch die experimentellen Arbeiten im Zusammenhang der einzelnen Arbeitsschritte jeweils dokumentiert.

"Die Zukunft des Bauens liegt nicht im künstlerischen Einfall, sondern in der präzisen Überprüfung des Realisierungsverfahrens, der Bautechnik und im praktischen Know-how."<sup>4</sup> Dies erfordert jedoch vom Architekten Kenntnis der Materialeigenschaften sowie die Beherrschung der technischen Mittel und entsprechendes Wissen über Konstruktionsmethoden.

Dabei muss die Entwicklung neuer Technologien oder die Optimierung vorhandener Systeme auch stets im Zusammenhang von Qualitätsvorteilen und/oder Kosteneinsparungen gesehen werden.<sup>5</sup> Dieser Ansatz bildet einen wesentlichen Bezugspunkt für die dargestellten konzeptionellen und experimentellen Arbeiten.

## Anmerkungen

- <sup>1</sup> Vgl. Schölkopf (Hg.), 2002 und Beck (Hg.), 2001
- <sup>2</sup> Das Projektvolumen betrug in den Jahren 1999 bis 2002 insgesamt knapp 325.000 €, davon 100.000 € Industriemittel. Zum Vergleich, die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) förderte das Projekt "Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuen Technologie" in den Jahren 1999 bis 2002 mit umgerechnet 3.272.270 €. Dies verdeutlicht auch die (finanziell) eingeschränkten Rahmenbedingungen. Vgl. Hegger/Molter, 1/2001, S. 42
- <sup>3</sup> Für den Autor stellten viele Arbeitsschritte 'Neuland' dar und der Blick in die Labors und auf die Geräte soll ermuntern (vielleicht auch ermutigen) sich als Architekten derartigen Themen zu stellen.
- <sup>4</sup> Pizzigoni, 1999, S. 87
- <sup>5</sup> Vgl. Conrads, 3/1985, S. 295-296; Fiebiger, 1998; Watts, 2001; Chevalier, 3/2002, S. 31-36; Hullmann, 12/2002, S. 26-29

### 2.1 Zielsetzung und struktureller Aufbau der Arbeit

Holzleichtbeton ist ein wieder entdeckter Konstruktionswerkstoff, dessen baukonstruktive und bauphysikalische Materialeigenschaften sowie potentielle Einsatzmöglichkeiten im Bereich des Hochbaus noch nicht erschöpfend behandelt sind.

Holz und Beton zeigen verschiedene materialspezifische Vor- und Nachteile. Auf dem Sektor der Konstruktionen (Decke, Wand) stehen beide eher in Konkurrenz miteinander. Zunehmend werden auch im Holzbau Kombinationen erprobt. Gerade in den Verbundkonstruktionen können vielfältige Synergieeffekte, durch sinnvolle Nutzung der positiven Eigenschaften beider Materialien, wirksam werden.

Die Beurteilung und Auswahl der Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton erfordert zunächst eine genaue Kenntnis der Materialeigenschaften, hinsichtlich baukonstruktiver, bauphysikalischer und fertigungstechnischer Parameter, ökologischer Aspekte, Wirtschaftlichkeit und Innovationspotenzial.<sup>1</sup> Darüber hinaus ist gerade aus Sicht des Architekten ebenso die Arbeit an gestalterischen Optionen von großer Bedeutung.

Hinsichtlich des Leistungsvermögens von Holzleichtbeton sind zunächst zwei Einsatzbereiche zu unterscheiden:

- Alternative zu herkömmlichen Baustoffen, in erster Linie Normal- und Leichtbetone
- Erschließung neuer Anwendungsfelder, zum Beispiel durch den Einsatz als Material für thermisch aktive Bauteile beziehungsweise durch die Entwicklung neuer Rezepturen

Die vorliegende Arbeit ist im Wesentlichen in drei Schwerpunkte gegliedert: (Abb. 2.1–2.4)

- Material
- Anwendungsbezug
- Außenwand

Im Bereich "Material" (Kapitel 2 bis 4) werden der aktuelle Wissensstand skizziert sowie eine Begriffsbestimmung, als Abgrenzung gegenüber weiteren Materialien, unternommen, und zunächst wesentliche Eigenschaften, Kenngrößen und Einflussfaktoren der Ausgangsmaterialien zusammengefasst. Darüber hinaus wird in diesem Teil ein historischer Abriss zum Thema gegeben. Bei der Betrachtung des Arbeitsfeldes fällt auf, dass eine Darstellung der Entwicklung, von ersten Materialexperimenten im 19. Jahrhundert bis zu den unterschiedlich erfolgreichen Versuchen der Etablierung einer Produktpalette, zu dem Themenkomplex fehlt. Somit soll die Arbeit einen Überblick zu vorhandenen und laufenden (wissenschaftlichen) Untersuchungen zum Holzleicht- beziehungsweise Holzbeton, mit Berücksichtigung der Einsatzmöglichkeiten im Bereich von Gebäudefassaden, geben und einen geschichtlichen Exkurs beinhalten.

Der zweite Bereich (Kapitel 5 bis 7) beschäftigt sich mit unterschiedlichen Nutzungsformen beziehungsweise Ausprägungen von Holzleichtbeton.

Nach einer kurzen Zusammenfassung bestehender sowie zu erwartender Merkmale des Verbundwerkstoffs, erfolgen Untersuchungen auf drei Betrachtungsebenen, die aufeinander aufbauen, als Material für

- thermisch passiv wirksame Bauteile
- thermisch aktiv wirksame Bauteile
- Kombinationen mit Latentwärmespeichermaterialien (Phase Change Materials = PCM)

Neben der Ermittlung von Grundlagen für ein "passives" Außenwandbauteil wird über eine Vertiefung hinsichtlich der Eignung für "thermisch aktive" Bauteile eine Erweiterung durch

Methodisches  
Vorgehen

Zielsetzung und  
struktureller Aufbau  
der Arbeit

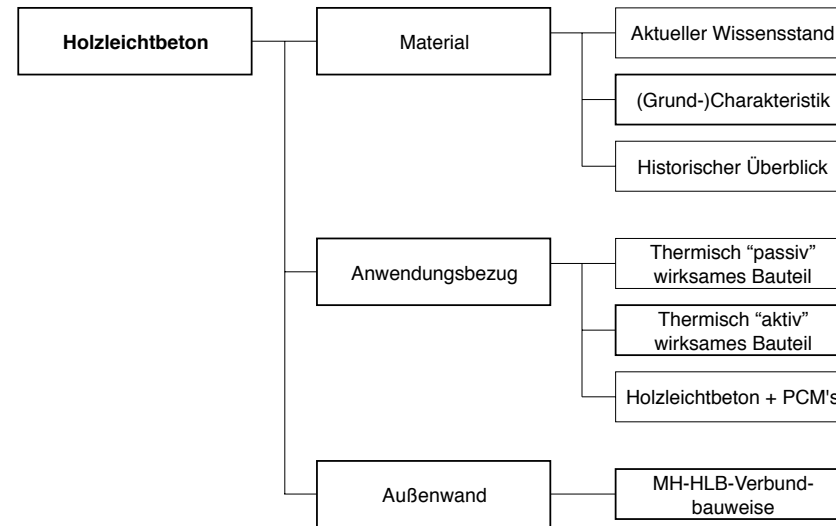


Abb. 2.1 Aufbau der Dissertation

Abb. 2.2 Herstellung von Musterplatten aus Holzleichtbeton

Abb. 2.3 Vermessung eines thermisch aktiven Funktionsmodells aus Holzleichtbeton

Abb. 2.4 Mehrschichtiger Wandaufbau in Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise (HLB-MH)

Experimente mit neu(artig)en Rezepturansätzen durchgeführt.

Dabei umfasst jede Betrachtung die Darstellung baukonstruktiver Aspekte (unter anderem Mischungen, Rohdichte, Festigkeitswerte), bauphysikalischer Gesichtspunkte (unter anderem wärme- und feuchtetechnisches Verhalten) und architektonischer Aspekte (unter anderem klimatischer und baulicher Gesamtzusammenhang, Oberflächenwirkungen). Ferner erfolgen ergänzend zu den ermittelten Kenndaten, anhand von Potenzialabschätzungen, erste Charakterisierungen hinsichtlich des zu erwartenden thermischen Verhaltens des Materials beziehungsweise des Bauteils.

Für den Bereich passiv wirksames Bauteil werden wesentliche Vorarbeiten aus der EPF Lausanne/I-Bois, ergänzt mit eigenen Versuchen insbesondere hinsichtlich bauphysikalischer Parameter, dargestellt.

Ein neuer Ansatz ist die Untersuchung von flächigen Bauteilen aus Holzleichtbeton zum Einsatz als Massivabsorber.<sup>2</sup> Gerade durch den Einsatz von thermisch aktiv wirksamen Bauteilen kann der Verbrauch von Strom, Gas oder Öl für Gebäudeklimatisierung, und somit auch die Umweltbelastung, zusätzlich reduziert werden, bei einem durch die besonderen, positiven Eigenschaften des Holzes angenehmen Raumklima. Aufbauend auf diese Kapitel sind die Untersuchungen zur Kombination von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien angelegt. Seit einigen Jahren forscht man in unterschiedlichen Bereichen an der Verbindung dieser hochwärmespeichernden Materialien mit organischen und anorganischen Baustoffen. Gerade diese Kombination verspricht weitere funktionale Vorteile. Dies erfordert jedoch umfangreiche Grundlagenstudien, wie die Konzeption und Anfertigung von Rezepturen, die Ermittlung baukonstruktiver und bauphysikalischer Parameter.

Im abschließenden Kapitel 8 werden bauliche Zusammenhänge dargestellt. Dies umfasst vor allem experimentelle Untersuchungen zu farbigen und strukturierten Oberflächen sowie erste Ansätze zum Einsatz von Betonzusatzmitteln. Daran schließt sich eine Darstellung prinzipieller Aufbauten und Schichtenfolgen als Grundlage zur Entwicklung von (Außen-)Wandkonstruktionen in der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise an.

Ziel der Untersuchungen ist die Erlangung einer gesicherten Datenbasis für die Entwicklung und den Bau von bautechnisch praktikablen und wirtschaftlich marktfähigen Elementen. Ferner sollen Grundlagen für die Herstellung 'konventioneller', das heißt in Ort-beton hergestellter sowie industriell gefertigter (Außenwand-)Bauteile erarbeitet werden.<sup>3</sup>

Holz als tragender Baustoff, ob als Konstruktionsvollholz oder in Verbundbauweisen, kann sich am Bauproduktmarkt nur dann erfolgreich(er) durchsetzen, wenn die Konstruktionen Qualitäten aufweisen, welche nicht nur funktional, technisch und gestalterisch überzeugen, sondern auch in der Wirtschaftlichkeit begründet sind. Daher liegen der Arbeit als konzeptioneller Prospekt, die Erhöhung von Materialvarianten sowie die Konzeption neuer Konstruktionen zugrunde, die auch einen möglichst hohen Vorfertigungsgrad erlauben, um einen innovativen Beitrag für die Material-, Technik- und Formvielfalt von Zement gebundenen Holzwerkstoffen zu leisten.

Bei der Durchführung der Arbeiten wurde deutlich, dass mit der Untersuchung und Weiterentwicklung von Holzleichtbeton nicht nur eine Vielzahl von weit verzweigten Forschungsaktivitäten berührt wird, sondern dass es sich um ein Material handelt, das zwischen zwei 'Baustoffwelten' angesiedelt ist. Dies betrifft sowohl die unterschiedliche Mentalität der handelnden Akteure als auch die Verschiedenartigkeit der betroffenen Unternehmensstrukturen.

## 2.2 Aktueller Wissensstand – Forschungsaktivitäten

Betrachtet man den aktuellen Wissensstand zum erweiterten Themenkomplex, ist festzustellen, dass die Arbeit im Wesentlichen drei Forschungsbereiche berührt:

- Betontechnologie
- Zement gebundene Holzwerkstoffe
- Latentwärmespeichermaterialien

Aus der Fülle an Projekten werden besondere Schwerpunktsetzungen und für die Dissertation wichtige (Vor-)Arbeiten dargestellt.

### 2.2.1 Betontechnologie

Der Bereich der Betontechnologie umfasst in der Breite wie in der Tiefe die umfangreichsten Forschungsaktivitäten. Dabei seien vereinfachend für den Hochbau drei Arbeitsfelder beispielhaft herausgestellt:

- Selbstverdichtende Betone
- Hochfeste (Konstruktionsleicht-)Betone
- Textilbewehrte Betone

Als eines der "Topthemen"<sup>4</sup> der Betonbautechnologie gilt der so genannte selbstverdichtende Beton (SVB) beziehungsweise Self-Compacting-Concrete (SCC). Ziel ist die Vermeidung von Verdichtungsarbeit am Frischbeton, sei es auf der Baustelle oder im Fertigteilwerk. Mittels neu entwickelter Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether (PCE) und einer hohen Dosierung von Zusatzstoffen (Steinmehl oder Flugasche mit Korngrößen  $\leq 0,125$  mm), gegebenenfalls unter Zugabe von Stabilisatoren, lassen sich Betone mit sehr hoher Fließfähigkeit bei entmischungsfreien Viskositäten einstellen, die ohne mechanische Einwirkung entlüften und sich selbst verdichten.

Dadurch wird die Herstellung von besonders schlanken Bauteilen mit engliegender Bewehrung und anspruchsvoller geometrischer

Methodisches Vorgehen

Aktueller Wissensstand – Forschungsaktivitäten

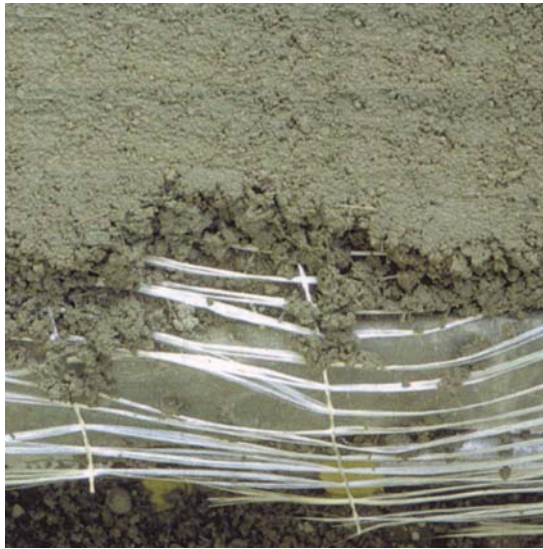


Abb. 2.5 Verwendung von alkaliresistenten Glasfasern in Normalbeton (etwa Originalgröße)

Form bei gleichzeitig guten Sichtbetonflächen und dichter Oberflächenstruktur deutlich verbessert.<sup>5</sup>

Entwicklungen im Festbetonbereich erstrecken sich auf die Erhöhung der Festigkeiten und des Widerstands gegenüber schädigenden Angriffen von flüssigen oder gasförmigen Medien (Frost-Chlorid-, chemische Angriffe; Auffangbauwerke für wassergefährdende Stoffe). Diese Betone werden deshalb auch als Hochleistungsbetone bezeichnet. Im internationalen Hochhausbau sind Betonfestigkeiten von über  $135 \text{ N/mm}^2$  erreicht worden. Diese Betone weisen einen niedrigen Wasser/Zement-Wert auf und besitzen durch den Einsatz von silikatischen Feinststäuben (Silicastaub) ein sehr viel dichteres Zementsteingefüge. Die Partikel sind um den Faktor 100 kleiner als Zementkörner, füllen dadurch die

Porenräume zwischen den Zementkörnern, erhöhen den Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskörnung und bilden zusätzlich festigkeitssteigernde Calciumsilikathydrate. Allerdings scheinen die Grenzen der Festigkeitssteigerung keineswegs ausgeschöpft. So erreicht man unter Laborbedingungen bereits Druckfestigkeiten von  $600 \text{ N/mm}^2$ . Durch Zugabe von Stahlfasern sowie eine zusätzliche Druck- und Hitzebehandlung konnten in Frankreich mit so genannten "ultra hochfesten" Betonen sogar Festigkeitswerte bis  $800 \text{ N/mm}^2$  erzielt werden. Damit liegen mineralische Werkstoffe mittlerweile bei den Abmessungen und Gewichten im Bereich des Stahlbaus.<sup>6</sup>

Ein wichtiges Anwendungsfeld hochfester Betone bildet der Fertigteilebau. Die Abnahme der Querschnittsabmessungen führt zur Senkung der Bauteilgewichte und damit zu niedrigeren Transport- und Montagekosten. Neben der Beschleunigung des Herstellungsprozesses durch schnellere Hydratation (Festigkeitsentwicklung) kann gerade im Fertigteilewerk die für den hochfesten Beton erforderliche Qualitätssicherung gewährleistet werden. Eine weitere Form der Hochleistungsbetone ist der hochfeste Konstruktionsleichtbeton. Dieser verbindet niedrige Rohdichten mit hoher Druckfestigkeit und großer Dichtigkeit. Darüber hinaus führen Weiterentwicklungen in der Betontechnologie, zum Beispiel neuartige Umhüllungen von Leichtzuschlägen,<sup>7</sup> zur Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten bei gleichzeitiger Erhöhung der Witterungsbeständigkeit. Durch diese Materialeigenschaften, in Verbindung mit einer schnellen Festigkeitsentwicklung, ist der hochfeste Konstruktionsleichtbeton ebenfalls besonders für Anwendungen im Fertigteilebau geeignet.<sup>8</sup>

Neben diesen werkstofflichen 'Superlativen' gewinnt die Kombination von Beton mit kor-

rossionsbeständigen textilen Fasern als Bewehrungsmaterial zunehmend an Bedeutung. (Abb. 2.5) Dieser neue Konstruktionswerkstoff "Textilbewehrter Beton" ermöglicht durch den Einsatz von Fasern die Fertigung relativ dünnwandiger Bauteile, da nur mehr eine geringe Bewehrungsüberdeckung zum Schutz vor Korrosion und Hitzeversagen im Brandfall erforderlich ist.

Von den mechanischen Eigenschaften bis zur Bauteilentwicklung werden seit Juli 1999 unter anderem an der RWTH Aachen in experimentellen Untersuchungen – im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereiches (SFB) 532 "Textilbewehrter Beton" Grundlagen für die Entwicklung dieser Technologie erarbeitet. Die bisher vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass textilbewehrter Beton über die Substitution herkömmlicher Materialien und vorhandener Konstruktionen hinaus auch für den Betonbau neue Anwendungsfelder erschließen kann.

Neben den großen Erwartungen an die Verwendung von textilen Fasern kennzeichnet die aktuellen Forschungen im Bereich der Betontechnologie vor allem ein verstärkter Einsatz von bauchemischen Stoffen. Dabei werden einerseits für Zement gebundene Werkstoffe mittlerweile extrem hohe Festigkeitswerte erzielt, andererseits gelingt die Herstellung äußerst gefügedichter Sichtbetonoberflächen. Diese Entwicklungen zielen besonders auf neue Impulse im Fertigteilebau.

### 2.2.2 Zement gebundene Holzwerkstoffe

Die Entwicklungsziele von Holzwerkstoffen waren und sind einerseits eine bessere Ausnutzung des (Baum-)Holzes, das heißt die Verwertung von Schwachholz sowie Holzreststoffen, andererseits eine Optimierung baukonstruktiver und bauphysikalischer Kenngrö-



Ben, unter Beibehaltung der positiven Eigenschaften des Holzes. Ebenso gilt es durch gezielte Verfahrensschritte die mitunter großen natürlichen Schwankungen im Material einzuschränken beziehungsweise ganz auszuschalten, um mittels definierter und standardisierter Rechenwerte Holz(-werkstoffe) auch verstärkt im Bereich industrieller Fertigungstechniken zu etablieren.

Verbundwerkstoffe aus mineralischen Bindemitteln und organischen Zuschlagsstoffen sind bereits seit vielen Jahrzehnten am Bauemarkt verfügbar. Produkte, wie Steinholz, Holzwolle-Leichtbauplatten, Zement gebundene Werkstoffplatten, Holzspan-Mantelsteine, stehen dabei im Wettbewerb mit rein mineralischen Werkstoffen oder Holzwerkstoffen. Erst durch eine verstärkte Verwertung von Abfällen aus der Holz verarbeitenden Industrie sind in den vergangenen Jahren erneut Anstrengungen unternommen worden, um Zement gebundene Holzwerkstoffe weiter zu entwickeln und neue Anwendungsgebiete zu erschließen. In diesem Zusammenhang ist zum Beispiel auf ein neues Produkt zur Wärmedämmung, mit Zementleim imprägnierte Holzspäne, so genannte Climate Chips, zu verweisen.<sup>9</sup> Darüber hinaus ist eine weitere Zielsetzung, langfristig – wo möglich – Gesteinskörnung durch das nachwachsende Material Holz zu ersetzen.

Im Bereich der Zement-Holz-Wasser-Mischungen markieren vor allem zwei Arbeiten aus den 1990er Jahren wichtige Forschungsschwerpunkte. Untersuchungsgegenstand ist einerseits der (negative) Einfluss von Inhibitoren auf die Zementhydratation, andererseits werden Grundlagen zum Holzleichtbeton mit dem Ziel, die Zugfestigkeit des Materials zu verbessern, erarbeitet.

Bärbel Schubert analysiert, anknüpfend an die umfangreichen Forschungen in der ehe-

maligen Deutschen Demokratischen Republik zum Holzbeton, in ihrer Dissertation<sup>10</sup> die Wirkung von Holzinhaltsstoffen auf die Zementhydratation und Möglichkeiten einer gezielten Einflussnahme. Schubert stellt heraus, dass zwar der negative Einfluss des wasserlöslichen Holzzuckers beim Abbindevorgang in Forschung und Praxis unbestritten sei. Welche Auswirkungen und welchen Anteil jedoch weitere Stoffe, wie phenolische Inhaltsstoffe oder Hemicellulosen, an der Zementinhibition aufweisen, sei nicht eindeutig geklärt. Ebenso weist die Autorin daraufhin, dass bezüglich des "Reaktionsmechanismus der Zementinhibition" unterschiedliche "Theorien" bestünden.<sup>11</sup>

Ziel der sehr spezifischen Studien im Bereich der Materialchemie ist, bei Holz-Zement-Mischungen "den möglichen Holzarteneinsatz bei gleichbleibenden Qualitätsparametern der Werkstoffe zu erweitern"<sup>12</sup>. Gerade hinsichtlich der Fertigung von Holzwolle-Leichtbauplatten, Holzbeton und Zement gebundenen Holzspanplatten erwartet man sich Hinweise zu einer größeren stofflichen Unabhängigkeit bei der Auswahl der Holzarten.

Ein mittlerweile etabliertes Zentrum im Bereich von Forschungen zum Holzleichtbeton hat sich am Lehrstuhl für Holzkonstruktionen der EPF Lausanne/I-Bois herausgebildet. Es ist vor allem Prof. Julius Natterer, dem es an seinem Institut in einer Vielzahl von Arbeiten gelang, dem Thema wieder neue Impulse zu verschaffen.

Seit Mitte der 1990er Jahre werden dort vor allem baukonstruktive Grundlagen zum Holzleichtbeton erarbeitet.<sup>13</sup> Kai-Uwe Gliniorz untersucht – ebenfalls im Rahmen einer Dissertation – neue Rezepturreihen zur Verarbeitung von Restprodukten der Holz verarbeitenden Industrie mit anorganischen Bindemitteln und bestimmt anhand von "Regressionsgleichungen" die Interdependenzen verschiede-

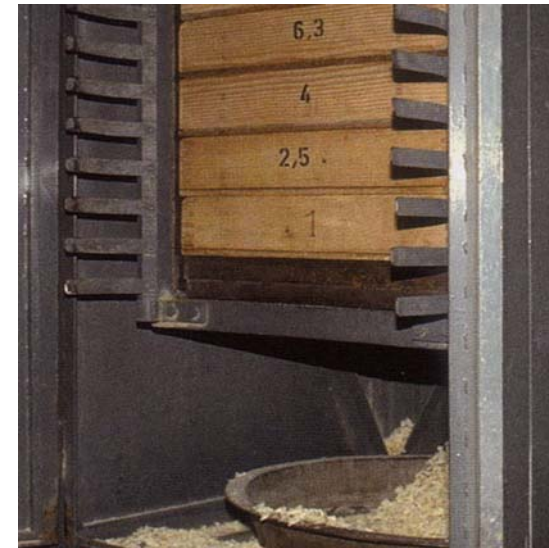


Abb. 2.6 Siebmaschine mit verschiedenen Einsätzen zur Sortierung von Restholz an der EPFL/I-Bois

ner Parameter, wie Korngrößen des Restholzes (Abb. 2.6), Zementart, Holzgehalt, Wasser-Zement-Wert. Diese Arbeiten ergänzt die Ermittlung bauphysikalischer und baukonstruktiver Eigenschaften sowie die Untersuchung des Tragverhaltens unterschiedlicher Systeme im Rahmen einer Bauteilstudie. Damit wurden an der EPF Lausanne/I-Bois wichtige Grundlagenarbeiten geleistet, mit dem angestrebten Ziel, neben bereits am Markt bestehenden Holz-Zement-Wasser-Baustoffen eine "Baustoffreihe zum Normalbeton unter Zugabe eigenschaftsverändernder Holzmaterialien und unter Beachtung exakt definierter Nebeneinflüsse"<sup>14</sup> weiterzuentwickeln.

Für den Bereich der Zement gebundene Holzwerkstoffe zeigt sich, dass die Potenziale, die

Methodisches Vorgehen

Aktueller Wissensstand – Forschungsaktivitäten

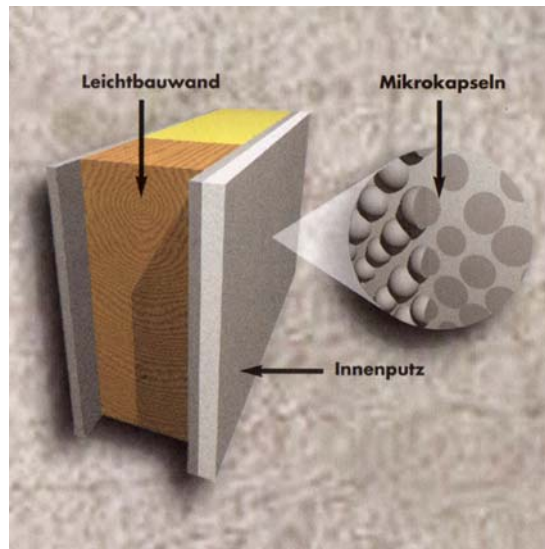


Abb. 2.7 Mikroverkapselte Latentwärmespeichermaterialien in Gipsputzen

in dieser Materialkombination liegen, (wissenschaftlich) bisher noch wenig erschöpfend behandelt sind. Das Kompositmaterial, eingebettet zwischen den beiden tradierten Baustoffen Holz und Beton sowie einer als Material auf Wärmedämmung reduzierten Verwendung, eröffnet eine Vielzahl funktionaler, konstruktiver und gestalterischer Vorteile.

### 2.2.3 Latentwärmespeichermaterialien

Latentwärmespeichermaterialien stellen im Baubereich einen noch recht neuen, gleichwohl seit einigen Jahren sehr aktiven Forschungsschwerpunkt dar. Man verspricht sich – auch seitens der Industrie – von den organischen beziehungsweise anorganischen Stoffen besonders im Bereich der Leichtbauten ein großes Innovationspotenzial.<sup>15</sup> Als denkbare Einsatzmöglichkeiten von Latentwärmespeichermaterialien werden in unter-

schiedlichen Systemvarianten untersucht:

- Speicherung von Wärme und Kälte
- Dämpfung von Temperaturzyklen
- Kappung von Temperaturspitzen
- Phasenverschiebung von Temperaturschwankungen

Mit eingelagerten PCM, wie Paraffinen oder Salzhydraten beziehungsweise Salzhydratmischungen in oberflächennahe Bauteilschichten, kann zum Beispiel die Wärmekapazität von Umschließungsflächen deutlich erhöht und somit das Raumklima bei hohen (Außen-)Temperaturen stabilisiert werden. Die über den Tag in das Gebäude eingestrahelte Wärme wird in den Wand- und/oder Deckenbeziehungsweise Bodenflächen gespeichert. Durch eine effiziente Kühlung muss in den Nachtstunden eine Entladung erfolgen. Beides gewährleistet im Zusammenwirken angenehm temperierte Räume im (Hoch-)Sommer.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) fördert in diesem Zusammenhang zwei große Verbundprojekte. Unter der Federführung des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg werden gemeinsam mit verschiedenen Industriepartnern Latentwärmespeichermaterialien für die Raumklimatisierung weiterentwickelt.<sup>16</sup> In diesem Projekt experimentiert man mit mikroverkapselten PCM-Material, das in wenige Millimeter dünne Putzschichten von leichten Wandaufbauten eingebracht wird. Das in winzigen Kunststoffkapseln versiegelte Paraffin erhöht deutlich die Wärmespeicherfähigkeit von Innenputzen und Trockenbauplatten. Die Art der Verkapselung verhindert eine Beeinträchtigung des Materialgefüges und der Festigkeit des Baustoffs. So erreicht nach Aussage der Forscher bereits eine 6 mm dicke Deckschicht die Speicherkapazität einer massiven Ziegelwand. Erste Produkte, mit denen eine neue Klasse

von Bauelementen für flexible Raumkonzepte begründet werden soll, wurden im Dezember 2003 vorgestellt.<sup>17</sup> (Abb. 2.7) Den zusätzlichen Vorteilen einer leichten Handhabung und einfacher Transportmöglichkeiten stehen indes noch hohe Materialkosten gegenüber. In dem zweiten Projektverbund Leitprojekt "Innovative PCM-Technologie" unter der Leitung des ZAE Bayern, Abt. 1: Energieumwandlung und -speicherung, in Garching erarbeiteten Firmen und Forschungsinstitute in sieben Teilprojekten neue Einsatzmöglichkeiten von PCM im Bereich der Gebäudetechnik, mit breitem Anwendungsspektrum, das über den Ansatz der Mikroverkapselung hinausgeht. In diesem mehrjährigen Forschungsprojekt<sup>18</sup> wird an neuartigen Produkten in allen Stufen, von der Stoffentwicklung und Materialcharakterisierung, über die 1:1-Erprobung einzelner Komponenten bis hin zum Aufbau von Gesamtsystemen gearbeitet.

Im Rahmen einer Dissertation an der Technischen Universität Berlin, Fachbereich 8 Architektur<sup>19</sup>, wird eine Untersuchung zur Kombination von Latentwärmespeichermaterialien mit Leichtbaumaterialien im Verbund mit transluzent gedämmten Außenwänden durchgeführt.<sup>20</sup>

Die Autorin kommt zu dem Ergebnis, dass bisherige Baustoffe mit PCM sich für die Kombination mit transluzenter Wärmedämmung (TWD) nicht eignen, da diese Materialien meist eine zu niedrige Wärmeleitfähigkeit für einen ausreichenden Wärmetransport aufweisen. Daher werden im Rahmen von experimentellen Versuchen einem Holzfaserverbundmaterial sehr gut leitende metallische Fasern (recyceltes Aluminium) beigemischt. Bei den Untersuchungen zeigt sich, dass für ein wirkungsvolles thermisches Verhalten die Ausrichtung der Fasern zielgerichtet und quer zur Wand erfolgen muss.

Mittels Simulationsrechnungen werden unterschiedliche, mehrschichtige Wandaufbauten mit TWD verglichen. Ziel ist bei gleichen raumklimatischen Bedingungen die Bauteilstärke und damit das Bauteilgewicht zu senken ohne den Jahresheizwärmebedarf zu erhöhen. Es zeigt sich, dass der spezielle Verbund von Latentwärmespeichermaterial und metallischen Fasern leichte und dünne raumhohe Wandkonstruktionen (z.B. 8 cm) ermöglicht. In Kombination mit einer TWD lassen sich damit herkömmliche schwere Speicherwandkonstruktionen aus Beton oder Kalksandstein ersetzen.

Die Optimierung des Systems steht im Zusammenhang mit dem Heizwärmebedarf des Gebäudes. Je geringer dieser Wert ist, desto größer muss der Aufbau der (Leichtau-)Speicherwand und desto niedriger die Schmelztemperatur des PCM sein.

Für baupraktische Anwendungen stehen noch Versuche sowohl hinsichtlich fertigungstechnischer Verbesserungen des "Holzfaser-Aluminium-Verbundes" als auch bezüglich der baukonstruktiven Ausbildung aus.

Die genannten Arbeiten werden von einer Reihe europäischer und internationaler Projekte begleitet.<sup>21</sup> Herstellerfirmen von PCM forschen über den Gebäudesektor hinaus ebenfalls an weiteren Einsatzmöglichkeiten. Von den kurz skizzierten Forschungen in den Bereichen: Betontechnologie, Zement gebundene Holzwerkstoffe und Latentwärmespeichermaterialien, stellt letzterer gewiss den augenblicklich am schwersten zu überblickenden Sektor dar. Weltweit sind viele Aktivitäten zu beobachten, deren Ausgang und Ertrag, insbesondere für den Bereich des allgemeinen Hochbaus zurzeit noch offen ist. Aber hier entsteht ein spannendes und viel versprechendes Arbeitsfeld, gleichermaßen für die Forschung und die (Bau-)Praxis.

### 2.3 Abgrenzung der Arbeitsschritte

Am Beginn der Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden ist festzustellen, dass trotz einer Reihe von Projekten, insbesondere zu den stofflichen Grundlagen von Holzleichtbeton viele Fragen noch nicht hinreichend erarbeitet beziehungsweise beantwortet sind. Da es bisher nicht gelang, dass Thema in einem größeren Forschungsverbund zu etablieren, blieben die bisherigen Aktivitäten auf zum Teil sehr spezifische Ansätze eingeschränkt.

Die vorliegenden Ergebnisse von Grundlagenuntersuchungen und ersten Einschätzungen zur Dimensionierung und Herstellung von Formbauteilen, lassen eine weitere Beschäftigung mit dem Material als äußerst aussichtsreich und viel versprechend erscheinen. Angesichts der Fülle an Arbeitsthemen – und Querbezügen – werden Einschränkungen und Abgrenzungen vorgenommen.

Dies betrifft zunächst die Art der Herstellung der Holzleichtbetonmischungen. Wie im vorhergehenden Kapitel kurz gestreift, sind die Fortschritte im Bereich der gegenwärtigen Betontechnologie ohne den Einsatz bauchemischer Stoffe nahezu nicht mehr denkbar. Trotzdem erscheint es insbesondere im Zusammenhang mit den erstmaligen Testreihen zur Kombination von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien sinnvoll, die Anzahl der Versuchsparameter einzuschränken und sowohl auf eine Vorbehandlung des Holzes als auch auf Betonzusatzmittel wie Fließmittel, Luftporenbildner etc. zu verzichten. Darüber hinaus ist daran gedacht, auch für spätere Anwendungen die Zusammensetzung auf möglichst einfach handhabbarer Basis zu untersuchen.

Eine weitere wesentliche Einschränkung betrifft eine ursprüngliche Zielrichtung, den Holzleichtbeton als statisch beanspruchbares Bauteil ebenfalls in die Untersuchungen mit einzubeziehen. Indes zeigen erste überschlägige Abschätzungen, dass sowohl mit einschalig/einschichtigen wie einschalig/mehrschaligen Wandaufbauten die Anforderungen an einen ausreichenden Wärmeschutz nur bedingt zu erreichen sind. Daher erscheint es richtig, sich bei den Untersuchungen von Beginn an auf wärmedämmende und wärmespeichernde Funktionen des Materials zu beschränken.

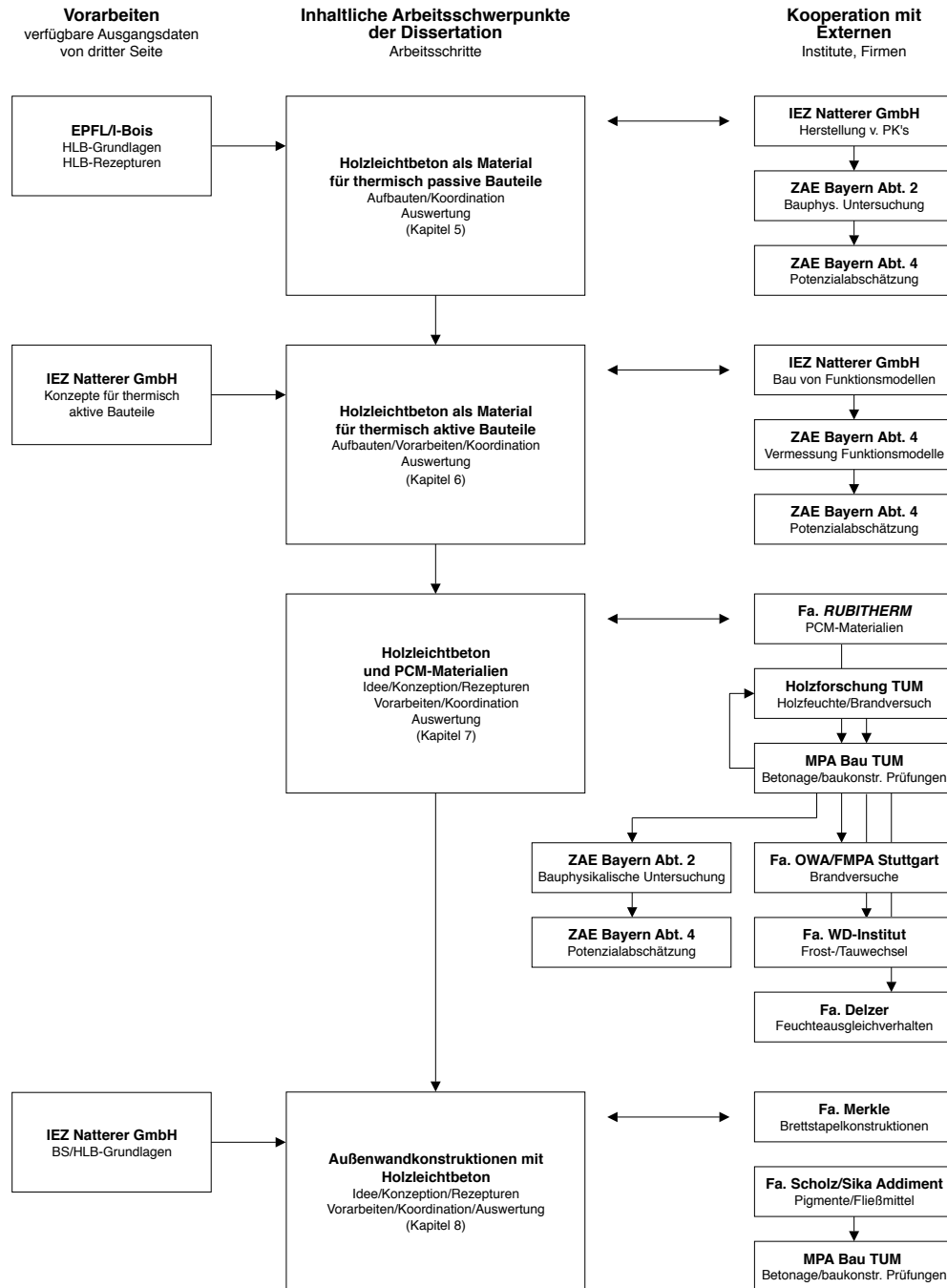
Des weiteren stellt im Sinne einer Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von (Massiv-)Holz die Kombination mit Brettstapelkonstruktionen zur Lastabtragung einen gleichermaßen baukonstruktiv effizienten wie ökologisch sinnvollen Arbeitsansatz dar.

Materialspezifische Untersuchungen an einem (neuen) Kompositmaterial können zur Erlangung aussagekräftiger, wissenschaftlich belastbarer Ergebnisse nur – insbesondere wenn ein solches Vorhaben an einem Architekten-Lehrstuhl bearbeitet wird – in Kooperation mit Experten als Partner aus Universitäten, öffentlichen und privaten Forschungsinstituten sowie Firmen aus den einschlägigen Forschungsbereichen durchgeführt werden. (Abb. 2.8)

Die Anzahl der wesentlich Beteiligten zeigt, dass im Rahmen dieser Dissertation eine interdisziplinäre Struktur aufgebaut werden konnte. Diese beinhaltet sowohl die Nutzung von Einrichtungen zum Herstellen und Vermessen von Prüfkörpern und Musterplatten, wie auch die Durchführung experimenteller Studien, deren begleitende Auswertung sowie sich daran anschließende Simulationsarbeiten.<sup>22</sup>

Methodisches Vorgehen

Abgrenzung und Positionierung der Arbeitsschritte



## Anmerkungen

- 1 Vgl. Hegger/Molter, 1/2001, S. 40
- 2 Es gibt nach Wissen des Autors bisher noch keine Experimente mit "aktiven" Verbundelementen auf Leichtbetonbasis.
- 3 Zur Positionierung der Arbeit vgl.: Hegger/Molter, 1/2001, S. 40-42
- 4 Vgl. Radwan, 07.09.2001, S. 20
- 5 Vgl. Selbstverdichtender Beton - eine Demonstration, 6/2001, S. 28; Ludwig et al., 2002, S. 113-131
- 6 Vgl. Hegger/Kommer, 2000, S. 45f.
- 7 Vgl. Müller, 1/1999, S. 184-193
- 8 Vgl. Hegger/Kommer, 2000, S. 55f.
- 9 Vgl. Fa. Dr.-Ing. Mahler+Partner GmbH, Finnentrop. Vgl. Prüfzeugnis der MPA NRW - Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, Nr. 42 0609 0 96, v. 20.08.1996
- 10 Schubert, 1991
- 11 Vgl. Schubert, 1991, S. 2
- 12 Schubert, 1991, S. 3
- 13 Vgl. u.a. Gliniorz/Natterer, 2000
- 14 Gliniorz/Natterer, 2000, S. 9
- 15 Vgl. [http://www.zae-bayern.de/pcm/index\\_neu.html](http://www.zae-bayern.de/pcm/index_neu.html) <28.07.2003>
- 16 Vgl. Kruse/Friedrich, 06/2002
- 17 Vgl. SOBIC Seminar, 03.12.2003
- 18 Das Projekt startete im Sommer 1999 und die Laufzeit beträgt 5 Jahre.
- 19 Am Institut für Konstruktives Entwerfen und Klimage-rechtes Bauen, Prof. Rainer Hascher
- 20 Lenzen, 2001
- 21 Wie den Workshops der International Energy Agency (IEA), ECES IA Annex 17, dem (neuen) EU Projekt MOPCON oder dem PCM-Gypsum board der Nottingham Trent University. Vgl. Mehling et al., 2002
- 22 Dabei waren neben den Werkstätten im Technischen Zentrum der Fakultät für Architektur insbesondere auch die Arbeitsräume des Materialprüfungsamts für das Bauwesen (MPA Bau) der Technischen Universität München eine wichtige professionelle Hilfe.

Abb. 2.8 Arbeitsstruktur mit den eingebundenen Kooperationspartnern aus Universitäten, öffentlichen und privaten Forschungsinstituten sowie Firmen

Die Entwicklungsgeschichte der Kombination von organischen Füllstoffen mit anorganischen Bindemitteln ist begleitet vom Gebrauch unterschiedlicher Termini. Dabei spielen einerseits der Herstellungsprozess und die hierzu verwendeten Ausgangsmaterialien eine wichtige Rolle, andererseits werden eingeführte Produktnamen, mitunter als eingetragene Warenzeichen und/oder tradierter Markenname, synonym verwendet.

Nicht einfacher wird der Sachverhalt, wenn eine Materialkombination Fachdisziplinen zweier wesentlicher Baustoffbereiche, mit jeweils weitgehend unabhängig voneinander etablierter Systematik, zusammenführt. In einem derart heterogenen Marktsegment einen Produktnamen<sup>1</sup> vorzuschlagen, soll zu einer begrifflichen Schärfung führen und auf Sinnfälligkeit sowie Prägnanz in Phonetik und im Gebrauch zielen.

Betrachtet man im Folgenden das "System Holz-Zement-Wasser"<sup>2</sup>, sind seit Mitte des 20. Jahrhunderts mehrere Bezeichnungen im Umlauf. In Meyers Großem Taschenlexikon<sup>3</sup> wird zunächst zwischen Holzzement und Holzbeton unterschieden. Holzzement bezeichnet einerseits Holzkitt; in diesem Zusammenhang wird auch von plastischem, flüssigem Holz gesprochen. Andererseits werden darunter im Bauwesen elastische, fußwarme Bodenbeläge aus Holzspänen und Zement verstanden. Unter Holzbeton fasst man einen "Leichtbeton aus Zement und Säge- oder Hobelspänen beziehungsweise Holzwolle" zusammen.

Diese aus den Ausgangsmaterialien Holz und Zement/Beton resultierende Begriffsbestimmung enthält jedoch bereits zwei daraus her-

vorgehende, unterschiedliche Produktentwicklungen: die Holzwolle-Leichtbauplatte und den Holz(span)beton.

Zement gebundene Holzspäne in Form von leichten, gepressten Platten gelten zwar als 'klassischer' Vorläufer des Holzbetons, sind auch die Leichtbauplatten aus Holzwolle in "gewissem Grade stofflich zum Holzbeton zu zählen"<sup>4</sup>, gleichwohl unterscheidet sich die Holzwolle-Leichtbauplatte sowohl hinsichtlich des stofflichen Gefüges, der Oberflächenstruktur als auch von den Anwendungspotenzialen her deutlich vom Holzbeton.

Entwicklungen in den 1930er Jahren zum Verbund von Holzspänen mit Zement als Bindemittel bilden die Grundlagen für Holzbeton, der auch als "Holzspanbeton"<sup>5</sup> bezeichnet wird. Vor allem in den Jahren nach 1945 werden vielfach Bemühungen um eine begriffliche (Neu-)Bestimmung des Materialkomposits sichtbar. Nach Hummel soll als Holzbeton ausschließlich ein mit Holz anstelle von Stahleinlagen bewehrter Schwer- oder Leichtbeton bezeichnet werden. Ferner schlägt er vor, Betone mit organischen Füllstoffen nach Art des Zuschlags zum Beispiel als "Sägemehlbeton", "Korkbeton" etc. zu bezeichnen.<sup>6</sup>

Auch Charisius thematisiert in seiner Arbeit eine mögliche Verwechslung der Materialien "Holzbeton" und "Holz bewehrter [Schwer-] Beton" und bezeichnet, letztlich in einer sehr allgemein gehaltenen Diktion, Holzbeton als "mehr oder weniger stark verdichtetes Gemisch von Zement mit organischen Zuschlagsstoffen, vornehmlich Sägespänen, Hobelspänen und Sägemehl, [...], dem mitunter begrenzte Mengen anorganischer Füllstoffe in Pulverform und sandähnlichen Aufbau zugesetzt werden."<sup>7</sup>

Neben den Ausgangsmaterialien bildet die Rohdichte (Raumgewicht) eine wichtige

Holzleichtbeton

Begriffs-  
bestimmung

Kenngroße zur Klassifizierung von Materialien. Die Betoneigenschaften, wie Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit etc., werden durch Art und Menge der verwendeten Zuschläge und Zusätze bestimmt und deren Gewicht sowie Gefügeart kennzeichnen die Betonarten. Die DIN EN 206-1 unterscheidet hinsichtlich der Trokrenrohddichte die gefügedichten Betone nach<sup>8</sup>

- Schwerbeton (> 2600 kg/m<sup>3</sup>)
- Normalbeton (> 2000 - 2600 kg/m<sup>3</sup>)
- Leichtbeton (≥ 800 - 2000 kg/m<sup>3</sup>)  
Haufwerksporige Leichtbetone, Poren- beziehungsweise Schaumbetone erreichen Rohdichtewerte zwischen 400 bis 1000 kg/m<sup>3</sup>

Bereits Charisius zählt den Holzbeton (mit Rohdichten zwischen 500 und 1500 kg/m<sup>3</sup>) explizit zu den Leichtbetonen, der sich aber durch die Art der Zuschlagsstoffe von den 'klassischen' Leichtbetonen unterscheidet. Darüber hinaus stellt er neben den günstigen Wärmedämm- und Bearbeitungseigenschaften vor allem das leichte Gewicht der Produkte heraus.<sup>9</sup>

Bezüglich der stofflichen Zusammensetzung von Holzbeton und Holzleichtbeton bestehen, vielleicht abgesehen von Formen der Holzvorbehandlung, keine nennenswerten Unterschiede. Eine Klassifikation allein hinsichtlich der Rohdichte vorzunehmen, erscheint indes schwierig<sup>10</sup>, da auch der Holz(span)beton Rohdichten im Bereich von 400 bis 600 kg/m<sup>3</sup> aufweist. Somit sind alle relevanten Merkmale und Eigenschaften eingeführt, die nun zusammengebracht werden müssen.

Vor diesem Hintergrund erscheint, auch als Abgrenzung zu den kleinformatischen Holzbeton-Mantelsteinen und mit Zielrichtung auf die Entwicklung und Etablierung eines leistungsfähigen Leicht-Baustoffs für eine industrielle Herstellung von Fertigteilen, die Kombination von "Holz" und "Beton" mit dem Adjektiv

"leicht" zu "Holzleichtbeton" gleichermaßen sachlich begründet und auch als Produktnamen prägnant und identifizierbar.

Erstmals hat Prof. Natterer, der in Rahmen von Forschungsarbeiten an der EPF Lausanne/I-Bois seit Mitte der 1990er Jahre das Thema neu behandelt, den Terminus "Holzleichtbeton"<sup>11</sup>, als Leichtbeton mit Holz als organischen Zuschlagsstoff, verwendet. Dieses Verbundmaterial setzt sich aus Sägespänen bzw. Sägemehl als Restprodukt aus der Holz verarbeitenden Industrie (vor allem Nadelhölzern wie Fichte, Tanne oder Douglasie), Zement (evt. Kalkzuschlag), Wasser und Additiven (zur Oberflächenbeschichtung, Farbgebung) zusammen.

Darüber hinaus soll kurz auf den Terminus "Holzwerkstoffe" Bezug genommen werden. In dem Buch "Holzplattenbau"<sup>12</sup> wird von den Autoren der Versuch einer Klärung untergenommen, da auch dieser Begriff nicht genau abgegrenzt ist und ebenfalls traditionelle Bezeichnungen sowie neue Produktnamen zu einer unübersichtlichen Marktsituation führen. Unter dem Sammelbegriff "Holzwerkstoffe" werden zunächst weiterhin alle aus Holz hergestellten Werkstoffe zusammengefasst und zusätzlich für Platten und Stäbe, die sich aus verschiedenen Ausgangsstoffen zusammensetzen, die Begriffe "Kompositholz" sowie "Kompositholzplatten" vorgeschlagen.<sup>13</sup> Für eine bessere Unterscheidung erscheint indes eine Differenzierung zwischen "Holzwerkstoffen" und "Holzverbundwerkstoffen"<sup>14</sup> sinnvoll:

- Holzwerkstoffe, als Produkte aus dem Verbund von Holz mit lignozellulosehaltigen Faserrohstoffen
- Holzverbundwerkstoffe als Produkte aus dem Verbund von Holz mit hydraulischen Bindemitteln, wie Faserzementplatten, Holzwolle-Leichtbauplatten

Somit kann Holzleichtbeton ebenfalls als Holzverbundwerkstoff bezeichnet werden, das heißt als 'mittel-'verdichtetes Gemisch aus etwa < 25 Masse-Prozent zerkleinerter Holzspäne beziehungsweise Sägemehl, etwa < 65 Masse-Prozent hydraulisches Bindemittel und Wasser sowie gegebenenfalls weiteren Zusätzen.

## 3.2 Ausgangsstoff Holz

Unter Holz werden umgangssprachlich meist Stämme, Äste und Wurzeln von Holzgewächsen zusammengefasst. Dagegen kommt Holz im Baubereich nahezu ausschließlich in bearbeiteter Form vor, einerseits als Halbzeug aus Vollholz, andererseits als Produkt aus Holz- und Holzverbundwerkstoffen.

Holz hat einen porösen, inhomogenen und, bezogen auf die Faserrichtung, anisotropen Gefügebau. Im Zentrum liegt das Mark, das von einem breiten Holzkörper umschlossen wird. Dieser setzt sich bei den meisten Holzarten aus dem sich durch Wechsel in Struktur und Färbung voneinander abhebenden Jahresringen zusammen. Die hellere äußere Zone besteht aus den lebenden jüngsten Jahresringen und wird als Splint (Weichholz) bezeichnet. Der dunkel gefärbte Kern ist das Kern-Holz, das durch die Einlagerung bestimmter Stoffe (Oxidationsprodukte von Gerbstoffen) besonders geschützt wird und daher eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber atmosphärischen Einflüssen, Pilzen und Insekten aufweist. Jahresringstellung und Faserverlauf sind wichtige Strukturmerkmale des Holzes und bestimmen dessen technische Eigenschaften.<sup>15</sup>

Die Holzarten werden auch vom Aufbau her in Nadel- und Laubhölzer unterschieden. Das Zellgefüge des entwicklungs- und geschichtlich älteren Nadelholzes ist einfacher aufgebaut als beim Laubholz, das 'spezialisierte' Zelltypen aufweist.<sup>16</sup> (Abb. 3.1)

### 3.2.1 Eigenschaften von Holz<sup>17</sup>

Holz ist ein sehr vielseitiger Baustoff, dessen Eigenschaften und Qualitäten sich hinsichtlich Holzart und Standort erheblich unterscheiden können. Bei den verschiedenen Holzarten

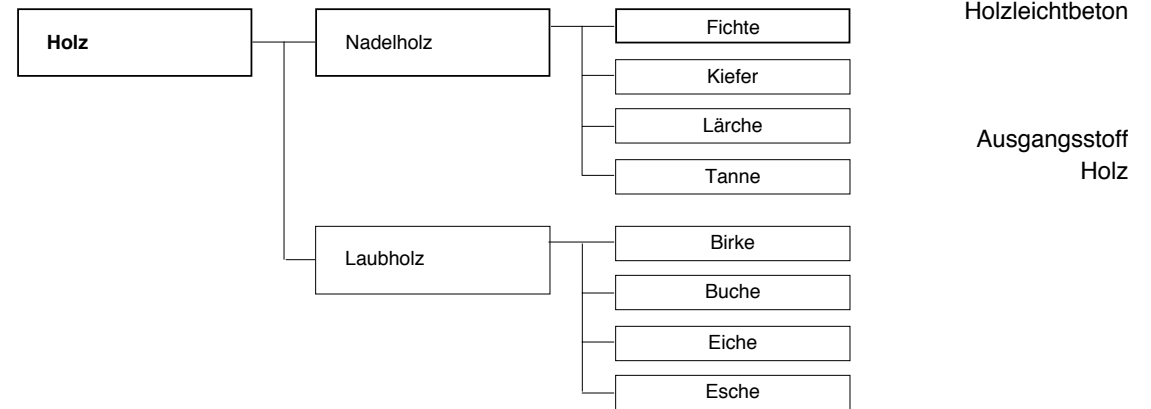


Abb. 3.1 Ausgewählte heimische Holzarten (Vgl. Natterer et al., 2/1996, S. 35)

schwankt die Rohdichte zwischen 100 und 1200 kg/m<sup>3</sup>. Sie kann aber auch innerhalb einer Holzart abweichen. Die Rohdichte, von der die anderen Holzeigenschaften wesentlich beeinflusst werden, ist wiederum abhängig von der Holzfeuchte.

Holz ist ein hygroskopisches Material, das die Eigenschaft besitzt, aus der Umgebungsluft Feuchtigkeit aufzunehmen (Absorption) und an diese wieder abzugeben (Desorption). Veränderungen der relativen Luftfeuchte beeinflussen somit die Holzfeuchte und wirken auf die Dimensions- und gegebenenfalls die Formstabilität von Holzbauteilen. Den Fasersättigungsgrad mit etwa 30 % Holzfeuchte erreicht Holz bei etwa 100 % Luftfeuchte beziehungsweise in feuchtegesättigter Luft.

Die Holzfeuchte [u], ermittelt über die Masse

$$u = \frac{m_u - m_o}{m_o} \cdot 100 [\%]$$

der feuchten [m<sub>u</sub>] und der trockenen Holzpro-

be [m<sub>o</sub>], nimmt erheblichen Einfluss auf die Holzeigenschaften. Eine Zunahme von Feuchte führt zum Quellen, eine Abnahme zum Schwinden. Diese Bewegungen werden zahlenmäßig in dem differentiellen Schwindmaß (radial/tangential) (in % je 1 % Holzfeuchteänderung) für nahezu alle Holzarten erfasst. Das Schwind- und Quellverhalten wird auch von der Struktur und dem Aufbau des Holzes beeinflusst.<sup>18</sup>

Die im Material sich einstellende Holzfeuchte ist maßgeblich von der Einbausituation beziehungsweise der Lage der Bauteile abhängig. Es sind bezüglich der Gleichgewichtsfeuchten nachfolgende prozentualen Anteile zu erwarten:

- Beheizte Innenräume 6 bis 12 %<sup>19</sup>
- Unbeheizte Dachräume 12 bis 18 %
- Bauteile im Freien unter Dach 12 bis 22 %

Für den Einbau von Holz bestehen darüber hinaus zusätzlich Anforderungen je nach Verwendungszweck als Konstruktionsholz oder Bekleidungsmaterial. Holz mit überwiegend

Holzleichtbeton

Ausgangsstoff  
Holz

Sägemehl, Sägespäne	43 %
Rinde	29 %
Bau- und Abbruchholz	10 %
Schwarten, Spreißel	9 %
Spanplattenabfälle	5 %
Staub und Schlamm	2 %
Holzschleifstäube	1 %
Sonstiges	1 %



bekleidenden Funktionen soll bereits beim Einbau der sich einstellenden Gleichgewichtsfeuchte der räumlichen Gegebenheit entsprechen. Für beheizte Innenräume ist eine durchschnittliche Holzfeuchte von 15 %, max. 17 % anzustreben, während für nicht beheizte Räume Werte zwischen 18 und 20 % zulässig sind.

Ein weiteres wesentliches Merkmal von Holz ist das ausgeprägt anisotrope Verhalten, das heißt es kann in Faserrichtung anders beansprucht werden als quer zur Faser. So unterscheidet sich zum Beispiel bei Fichte der Wert der zulässigen Zugspannung je nach Faserrichtung um mehr als das 20.000-fache (längs 10,5 N/mm<sup>2</sup>, quer 0,05 N/mm<sup>2</sup>). Während sich bei allen Holzarten die chemischen Bestandteile etwa gleich verteilen<sup>20</sup>, bestimmen ihre Inhaltsstoffe im Wesentlichen die Farbigkeit, den Geruch und die Verarbeitungseigenschaften sowie die Resistenz gegenüber organischen und tierischen Schädlingen.

### 3.2.2 Holz als Zuschlagsstoff<sup>21</sup>

Holz ist der einzige nachwachsende Baustoff, der für die Primärkonstruktion von Bauten eingesetzt werden kann. Darüber hinaus fällt es auch als Restprodukt der Holz verarbeitenden Industrie an, steht reichlich zur Verfügung und ist somit günstig,<sup>22</sup> was sich positiv auf Materialkosten auswirkt.

Bis zu 98 % des Restprodukts werden weiterverwertet,<sup>23</sup> (Abb. 3.2) etwa die Hälfte davon

Abb. 3.2 Restholz in Österreich 1988  
(Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 16)

Abb. 3.3 Restsägeholz, ungesiebt

Abb. 3.4 ... als Granulat, abgeseibt 2 mm

als Brennstoff. Dieser Anteil von Holzresten, in erster Linie Sägemehl und Sägespäne könnte indes in viel größerem Maßstab zusätzlich als Füllmaterial in Kompositbaustoffen beim Bauen 'veredelt' werden. Holzspäne und Sägemehl stellen ein 'nachhaltiges' nutzbares Bewehrungsmaterial sowie eine Füllsubstanz als Zuschlagsstoff dar.

Ein wesentlicher, auch ökologischer Ansatz ist die Verwendung regional vorhandener und verarbeiteter Holzarten. Aufgrund der großen regionalen Verbreitung von Nadelbäumen wie Fichte und Kiefer eignen sich diese besonders als Zuschlagsstoff. Beide Hölzer weisen durch die ähnliche Jahresringstruktur vergleichbare Zerspanungsbedingungen auf, das heißt es sind weitgehend gleich besetzte Siebfraktionen zu erwarten. Dagegen unterscheidet sich die Tränkbarkeit; während Kiefernholz rasch Wasser aufnimmt, vollzieht sich dies bei Fichte sehr langsam. Von den Laubbäumen lassen sich Buche und Birke ebenfalls leicht zerspanen; beide weisen jedoch einen deutlich geringeren Verbreitungsanteil auf.

Untersuchungen haben gezeigt, dass sich für eine Verbindung von Holz und Zementleim aufgrund der hemmenden Wirkung von Holz-inhaltsstoffen auf das Abbindeverhalten nicht alle Holzarten eignen.<sup>24</sup>

Für die Beurteilung der Bewehrungseigenschaften ist zu berücksichtigen, dass die Beimischung von Fasern und Spänen unterschiedliche Effekte erzielt. Holzfasern weisen eine höhere Zugfestigkeit auf und beeinflussen somit Dichte, Biegezugfestigkeit und E-Modul positiv.

Bei der Nutzung von Holz als Zuschlagsstoff ist abzuwägen, inwieweit die Notwendigkeit der exakten Ermittlung einer Sieblinie besteht, die unter Umständen für eine Stoffraumbere-



	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche
Darr-Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	400–430	460–510	640–720	600–700
Trocken-Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	430–470	510–550	700–790	650–760
Gleichgewichts-Holzfeuchte $\varphi = 37\%$ [%]	7	7	7,3	8,9
Gleichgewichts-Holzfeuchte $\varphi = 83\%$ [%]	16,4	15,3	15,7	17,2
Differentielles Schwindmaß (tang.) [%]*	0,27–0,36	0,25–0,36	0,38–0,44	0,28–0,35
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	10000–12000	10800–13000	12300–16400	10500–14500
Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	1,50	4,20	13,00	15,00
Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	0,60	1,50	4,50	5,20
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0,10–0,12	0,14	0,16	0,13–0,20
Spezifische Wärmekapazität [kJ/kgK]	2,1	2,1	2,1	2,1
Temperaturleitzahl [m <sup>2</sup> /s]	1,1·10 <sup>-7</sup> – 1,2·10 <sup>-7</sup>	1,3·10 <sup>-7</sup> – 1,2·10 <sup>-7</sup>	1,1·10 <sup>-7</sup> – 1,0·10 <sup>-7</sup>	1,0·10 <sup>-7</sup> – 1,3·10 <sup>-7</sup>
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	40	40	40	40
Brandschutz [Baustoffklasse]	B 2	B 2	B 2	B 2

Abb. 3.5 Kennwerte von ausgewählten Holzarten

\* zul. Grenzwerte siehe Natterer et al., 2/1996, S. 36f.

chung wesentlich sein kann.<sup>25</sup> (Abb. 3.3+3.4) Durch den Zuschlagsstoff Holz sind für Bauelemente aus Holzleichtbeton gute mechanische Eigenschaften bei

- geringem Gewicht
- verminderter Wärmeleitung
- guter Bearbeitbarkeit

zu erwarten.

Es ist darauf hinzuweisen, dass organische Materialien in der DIN EN 206-1 nicht berücksichtigt sind; es wird ausschließlich von Gesteinskörnung gesprochen. Somit bestehen

keine normativen Festlegungen für die Verwendung von Restholz als Zuschlagsstoff für Beton, sondern sind in der Regel baurechtlich Einzelzulassungen erforderlich.

### 3.3 Ausgangsstoff Zement/Beton

Beton ist ein Gemenge aus grobkörnigen Zuschlagstoffen, hydraulischen Bindemitteln (meist Zement, aber auch Kalk, Gips und Asphalt) und Wasser, das durch chemische Reaktionen erhärtet. Hergestellt durch Mischen in Zwangsmischern beträgt die Mischzeit abhängig von der Anlage in der Regel > 1 min.<sup>26</sup> Die Betoneigenschaften lassen sich durch unterschiedliche Zusätze beeinflussen und verbessern. Dabei sind stets die materialspezifischen Besonderheiten der Ausgangsstoffe und die jeweiligen Verarbeitungshinweise zu beachten. Zur Erhöhung der Zugfestigkeit werden Stahleinlagen verwendet. Für die Bemessung und Ausführung von Beton und Stahlbeton stellt die DIN EN 206-1 die wichtigste Norm dar.

#### 3.3.1 Zement

Unter Zement versteht man ein zur Herstellung von Beton und Mörtel verwendetes, auch unter Wasser erhärtendes (hydraulisches) Bindemittel, das durch Brennen von Kalk und Ton beziehungsweise von Mergel und anschließendem Vermahlen entsteht. Die wichtigste Zementart ist der Portland-Zement, der einen Gips- oder Anhydritanteil zwischen 3 und 5 % enthält.<sup>27</sup> (Abb. 3.6+3.7) Nach der Zugabe von Wasser erhärtet der erzeugte Zementleim sowohl an der Luft als auch unter Wasser. Der sich dabei bildende Zementstein weist Festigkeiten auf, die vom Wasser-Zement-Verhältnis (W/Z-Wert)<sup>28</sup> abhängen. Normalzemente werden nach DIN EN 206-1 in fünf Hauptarten (CEM I bis V) eingestuft, deren 27 Produkte sich jeweils anhand der Hauptbestandteile unterscheiden. Der heute gebräuchlichste Zement ist CEM II, ein Port-

Ausgangsstoff  
Zement/Beton



Abb. 3.6 Portlandkompositzement CEM II 32,5R

Abb. 3.7 Weißzement CEM I 42,5R



landkompositzement der mindestens 2/3 Masse-Prozent Portlandzementklinker enthält und jeweils einen weiteren Hauptbestandteil.

Nach DIN EN 197-1 genormte Zemente werden in den drei Festigkeitsklassen 32,5, 42,5 und 52,5 geliefert, wobei diese Bezeichnungen jeweils die untere Grenze der Druckfestigkeit nach 28-Tagen, geprüft an genormten Mischungen angibt.

Die Zementfestigkeit hat nur einen beschränkten Einfluss auf die zu erwartende Betondruckfestigkeit. Für letztere ist in der Regel der W/Z-Wert entscheidend, daneben im Rahmen der Verarbeitung die Verdichtung und die Nachbehandlung, das heißt der Schutz vor Austrocknung des Betons während seiner Erhärtungsphase.

Der Zementleim bildet den reaktionsfähigen Anteil im Beton. Er dient zum Verkleben der inerten (nicht reaktionsfähigen) Ausgangsstoffe, etwa der Zuschläge und Gesteinsmehle. Von seiner Porosität als Zementsstein hängen Festigkeit, Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit des Betonbauteils ab.

Unmittelbar nach der Zugabe von Wasser beginnt eine chemische Reaktion des Zements mit dem Wasser, die Hydratation.

Die Zustandänderungen des Zementleims beziehungsweise Frischbetons von flüssig/weich zum harten Zementstein beziehungsweise Festbeton laufen über gewisse zeitliche Stationen ab: Ansteifen, Erstarren und Erhärten mit zunehmender Viskosität des Betons.

Um eine ausreichende Verarbeitungszeit des formbaren Frischbetons zu gewährleisten, legt die Norm je nach Zementfestigkeitsklasse Anforderungen an den zulässigen Erstarrensbeginn zwischen 45 und 75 Minuten nach der Wasserzugabe fest. Nach dem Erstarren darf Frischbeton nicht mehr verarbeitet werden.

### 3.3.2 Beton <sup>29</sup>

Je nach Herstellungsverfahren und Art der Zuschläge kann der Beton gezielt unterschiedliche Eigenschaften erhalten. So erfordern hohe Tragfähigkeit und guter Schallschutz einen dichten Beton, während durch porige Zuschläge die wärmedämmende Funktion verbessert wird.

Die wichtigsten Betonarten sind Schwerbeton, Normal- und Leichtbeton. (Abb. 3.8)

- Beton mit einer Trockenrohddichte von mehr als 2600 kg/m<sup>3</sup> wird als Schwerbeton bezeichnet. Diese Dichten werden mit besonders schweren Gesteinskörnungen erzielt (> 3000 kg/m<sup>3</sup>), wie z.B. Schwerspat, Magnetit oder auch Stahlschrot. Einsatzbereich ist u.a. der Strahlenschutz.
- Als Normalbeton wird ein Beton mit einer Trockenrohddichte von > 2.000 bis maximal 2600 kg/m<sup>3</sup> bezeichnet. Auf diese Betonart bezieht sich die überwiegende Zahl der Anwendungen.
- Leichtbeton unterscheidet sich vom Normalbeton durch seine geringere Rohddichte (< 2.000 kg/m<sup>3</sup>). Seine Merkmale werden in erster Linie bestimmt von
  - den Eigenschaften der Leichtzuschläge, wie Bims, Blähton etc.
  - der Art des Betongefüges, haufwerksporig oder gefügedicht
  - dem Porenanteil, Poren- oder Schaumbeton. Haufwerksporiger Leichtbeton wird überwiegend für wärmedämmende Aufgaben eingesetzt

Darüber hinaus ist Beton in Druckfestigkeitsklassen eingeteilt. Die Doppelwerte nach dem C (Concrete = Beton) resultieren aus den Vereinheitlichungen zur DIN EN 206-1 und bezeichnen die Zylinder- und Würfeldruckfestigkeiten in N/mm<sup>2</sup>

- Normalfeste Betone (C8/10 bis C50/60)
- Hochfeste Betone (C55/67 bis C100/115)
- Leichtbetone (LC8/9 bis LC50/55)

Beton wird nach dem Ort der Herstellung als Transport- oder Baustellenbeton, nach dem Ort der Verwendung als Ortbeton oder Fertigteil bezeichnet. Nach dem Zustand der Erhärtung unterscheidet man Frischbeton, sofern er noch verarbeitbar, also verdichtbar ist, von Festbeton.

Je nach Weichheit oder Steifigkeit des Frischbetons ist ein unterschiedlicher Aufwand des Einbringens des Betons in seine vorgesehene Lage und zum Verdichten, das heißt dem Austreiben von Luftporen aufzuwenden.

Frischbeton lässt sich nach Norm in 7 Konsistenzklassen von "sehr steif" bis "sehr fließfähig" zu ordnen.<sup>30</sup> Der Nachweis der Zugehörigkeit zu einer dieser Klassen wird durch genormte Prüfverfahren erbracht, etwa dem Ausbreit- oder Verdichtungsversuch.

Zahlreiche Festbetoneigenschaften sind vom W/Z-Wert abhängig, der das Verhältnis von Wasser zu Zement ausdrückt. Allgemein gilt: je niedriger der W/Z-Wert, desto höher die Festbetonqualität.

Stahlbeton, der keinen sonstigen Umgebungsangriffen ausgesetzt ist, muss zum Schutz der Bewehrung vor Korrosion einen W/Z-Wert  $\geq 0,75$  einhalten. Bauteile, die wechselnder Feuchte, Trockenheit und Frost ausgesetzt sind, also die klassischen Außenwandbauteile mit direkter Bewitterung, sind im W/Z-Wert auf 0,60 begrenzt.<sup>31</sup> Ist das Betonbauteil noch stärkeren Angriffen ausgesetzt, zum Beispiel durch Chloride, sehr starkem Verschleiß oder chemischem Angriff, so können W/Z-Werte  $\leq 0,45$  gefordert sein.

Neben dem W/Z-Wert bestimmen Zementgehalt, Zusammensetzung und besondere Anforderungen an die Gesteinskörnungen und der Einsatz von Zusatzmitteln im Rahmen der Rezeptur die Dauerhaftigkeit des Betons. In Eignungsprüfungen wird die Erfüllung des Anforderungsprofils vorab festgestellt.<sup>32</sup>

Gesteinskörnungen nach DIN 4226 unterscheidet man nach der Dichte ihres Gefüges und der sich daraus ableitenden Trockenroh-dichte:

- Leichtzuschlag ( $< 2.000 \text{ kg/m}^3$ )
- Normalzuschlag ( $2.000 \text{ bis } < 3.000 \text{ kg/m}^3$ )
- Schwerzuschlag ( $> 3.000 \text{ kg/m}^3$ )

Für den Wasseranspruch, die Verdichtbarkeit, aber auch für eine Reihe von Festbetoneigenschaften ist die Korngrößenverteilung der im Beton verwendeten Gesteinskörnungen, entsprechend der Sieblinie von Bedeutung. Durch Wahl und anteiligen Einsatz der Korngruppen, die durch ihr jeweiliges Kleinst- und Größtkorn bezeichnet werden (z.B. 0/4 für feine Gesteinskörnungen mit einer Kornverteilung von 0 bis 4 mm), lassen sich die Sieblinien gezielt für die jeweiligen Anforderungen einstellen.

Neben Forderungen an die Kornzusammen-

setzung legt die Norm je nach Einsatzgebiet Grenzwerte in Hinblick auf Kornform, Frostabsplitterungen, Feinanteile ( $\leq 0,063 \text{ mm}$ ) oder auch quellfähige, stahlangreifende und organische Verunreinigungen fest.

Um die Betoneigenschaften (zum Beispiel Verarbeitbarkeit, Erstarren und Erhärten, Tausalz-widerstand) zu verändern beziehungsweise zu verbessern, können Zusatzmittel beigemischt werden. Es handelt sich dabei um Wirkstoffe, die dem Beton mittels flüssigem oder pulverförmigem Trägermaterial in sehr geringen Mengen, bezogen auf den Zementgehalt, zu gegeben werden.

Die für Normbeton zugelassen Mittel werden so genannten Wirkgruppen zugeordnet, von denen Betonverflüssiger (BV), Fließmittel (FM), Verzögerer (VZ) und Luftporenbildner (LP) die wichtigsten darstellen.<sup>33</sup>

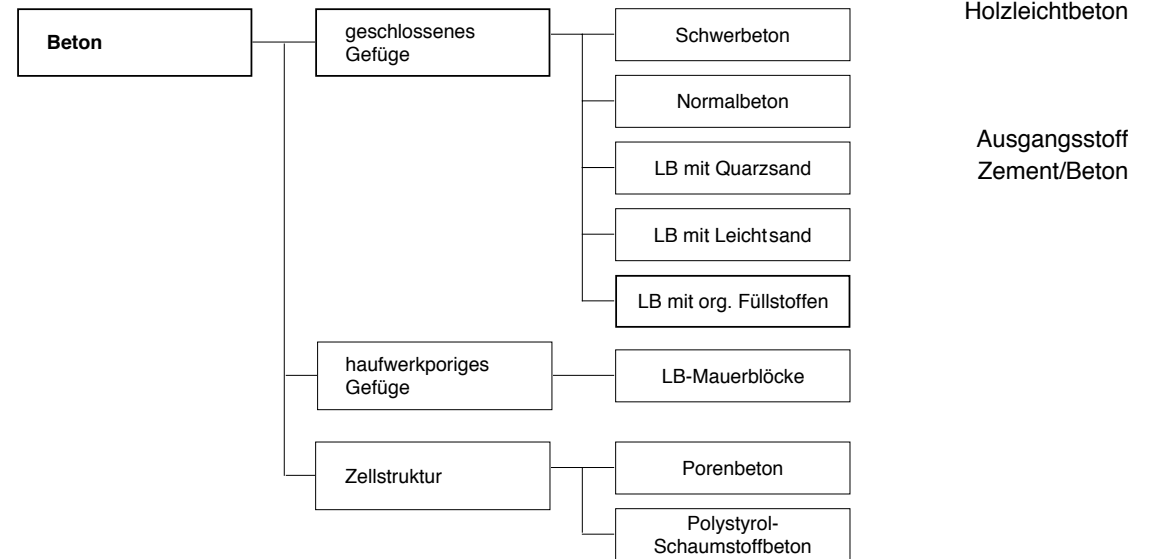


Abb. 3.8 Gängige Betonarten nach Gefügestruktur (Vgl. Kind-Barkauskas et al., 1995. S. 47)

Zuschlag	Gefüge	Rohdichte	Funktion / Anwendung
		[kg/m <sup>3</sup> ]	
Perlit, Vermiculit, Kunststoffschaumkugeln, Bims	teilhaufwerkporig, dicht	500 – 800	nur wärmedämmend Dämmplatten, Mörtel, Putze
Bims, Schaumlava, Blähton/-schiefer, Ziegelsplit, Schlacken, Kunststoffschaumkugeln	haufwerkporig, dicht	800 – 1200	vorwiegend wärmedämmend Hohlblocksteine, Vollsteine, Dach, Wandplatten
Bims, Blähton/-schiefer, Hüttenbims (Ziegelsplit)	dicht	1200 – 1800	konstruktiv wärmedämmend allgemeiner Betonhochbau, Sichtbeton
Blähton/-schiefer	dicht	1400 – 1800	vorwiegend konstruktiv biegebeanspruchte Bauteile
Organische Füllstoffe: Holzspäne, Sägemehl	teilhaufwerkporig, dicht	600 – 1600	vorwiegend wärmedämmend Mantelsteine, Wandplatten

Abb. 3.9 Leichtbetonen (ohne Porenbeton) nach ihrer Anwendung (Vgl. Aurich, 1971, S. 18)

Insbesondere hochwertige Ingenieurbetone sind heute ohne die Zugabe von Zusatzmitteln nicht mehr herstellbar. Betonzusatzstoffe dienen als feingemahlene Feststoffe vor allem zur günstigen Beeinflussung der Sieblinie im Mehlkorn- ( $\leq 0,125$  mm) Bereich (Flugasche, Silicastaub, Kalksteinmehl) oder zur Einfärbung von Beton (anorganische Farbpigmente).

### 3.3.3 Leichtbeton<sup>34</sup>

Leichtbeton<sup>35</sup> wird seit den 1960er Jahren verstärkt im allgemeinen Hochbau eingesetzt. Dessen besonders günstige Eigenschaften sind hohe Tragfähigkeit bei guter Wärmedämmung. Der Herstellung und Verarbeitung von Leichtbeton liegen im Prinzip die gleichen Regeln wie für Normalbeton zugrunde.

Ein wesentliches Merkmal des Leichtbetons, die geringe Rohdichte, wird durch die Gefügestruktur und das Erzeugen von Porenraum im Material erreicht. Der Porenraum kann durch haufwerkporiges Gefüge, porige Gesteinskörnung oder durch eine Kombination beider Methoden erzielt werden. (Abb. 3.9)

Beim Leichtbeton wird eine möglichst niedrige Rohdichte bei gleichzeitig möglichst hoher Festigkeit angestrebt, wobei sich beide Eigenschaften rein physikalisch gegenläufig verhalten. Die Rohdichte ist im Wesentlichen abhängig von der Porosität der Gesteinskörnung. Nach Aurich hat jedoch die Einteilung nach Gefügestruktur hinsichtlich der zu erzielenden Rohdichte eher "allgemein-informativ Charakter".<sup>36</sup> Eine weitere Klassifizierung

der Leichtbetone erfolgt nach den Anwendungsgebieten, da diese durch die Gesteinskörnungsart und das zu wählende Gefüge letztlich bestimmt werden.<sup>37</sup>

- Konstruktionsleichtbeton (dichtes Gefüge,  $\rho = 800$  bis  $2000$  kg/m<sup>3</sup>)
- Wärmedämmender Beton (dichtes bis haufwerkporiges Gefüge,  $\rho = 500$  bis  $800$  kg/m<sup>3</sup>)

Die leichten Dämmbetone weisen einen sehr hohen Porengehalt auf, der überwiegend auf die hohe Eigenporosität der Gesteinskörnung, mit entsprechend niedrigen Kornfestigkeiten zurückzuführen ist.

Bis auf den Porenbeton werden Leichtbetone mit porigen Zuschlägen hergestellt. Es gibt eine Vielzahl natürlicher und künstlicher leichter Gesteinskörnungen, deren Eigenschaften zum Teil stark variieren. Davon ist die Kornrohichte die wichtigste, da von dieser wiederum im Wesentlichen die erzielbare Betonrohichte abhängt.

Die Dosierung von leichten Gesteinskörnungen kann nach Gewichts- oder Volumenanteilen erfolgen. Abweichungen von der vorgesehenen Kornzusammensetzung können die Verarbeitbarkeit des Frischbetons sowie die Festbetonrohichte und -festigkeit stark verändern.

Bei der Herstellung von Leichtbeton kommt der Konsistenzbeurteilung eine große Bedeutung zu, denn das durch die hohe Porosität verursachte Wassersaugen der Gesteinskörnungen erfordert häufig ein Nachregeln der Wasserzufuhr, die auch zu Abweichungen von der gewählten Rezeptur führen kann. Zu weiche Betone können zu Entmischungen führen und zu steif verarbeitete Betone Verdichtungsprobleme aufweisen.

Das Einbringen von (gefügedichtem) Leichtbeton in stehender Schalung für die Herstel-

	Normal- beton	Leichtbeton mit Quarzsand	Leichtbeton mit Leichtsand	Polystyrol- Schaumstoff- beton	Leichtbeton Mauersteine	Poren- beton
Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2300–2500	1200–1600	800–1400	600–800	500–800	400–800
Gesteinskörnung/Zuschlag	Kies, Splitt, Schlacke	Blähton, Blähschiefer, Hüttenbims	Blähton, Blähschiefer, Hüttenbims	Natursand, Polystyrol	Naturbims, Blähton, Blähschiefer, Hüttenbims	Natursand
Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	C 8/10–C 50/60	LC 8/9–LC 25/28	LC 8/9–LC 25/28	LC 8/9–LC 25/28	LC 8/9–LC 25/28	LC 8/9–LC 25/28
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	22000– 39000	8000– 15000	bis 11000			
Wärmedehnzahl [mm/mK]	0,01	0,008	0,008	0,008	0,01	0,008
Primärenergieinhalt [kWh/m <sup>3</sup> ]	451	475		545		475
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	2,1	0,55–0,90	0,34–0,68	0,15–0,21	0,15–0,24	0,14–0,23
Spezifische Wärmekapazität [kJ/kgK]	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl *	70/150	5/15	5/15		5/15	5/10
Temperaturleitzahl [m <sup>2</sup> /s]	8,3·10 <sup>-7</sup> – 7,6·10 <sup>-7</sup>	2,3·10 <sup>-7</sup> – 5,1·10 <sup>-7</sup>	3,9·10 <sup>-7</sup> – 4,4·10 <sup>-7</sup>	2,3·10 <sup>-7</sup> – 2,4·10 <sup>-7</sup>	2,7·10 <sup>-7</sup>	3,2·10 <sup>-7</sup> – 2,6·10 <sup>-7</sup>
Brandschutz [Baustoffklasse]	A 1	A 1	A 1		A 1	A 1

Holzleichtbeton

Ausgangsstoff  
Zement/Beton

Abb. 3.10 Kennwerte von ausgewählten Betonarten (Vgl. Kind-Barkauskas et al., 1995, S. 45-60; Ebeling et al., 14/2002, S. 31, 43)

\* Es ist jeweils der für die Baukonstruktion schlechtere Wert anzunehmen

lung von Sichtbetonflächen, stellt besonders hohe Anforderungen an die Qualität und die Verarbeitung des Frischbetons. Gegenüber dem Normalbeton stellt vor allem die gewichtsbedingte Entmischungsgefahr aufgrund der unterschiedlichen Rohdichten von Grobkorn und Sand ein zusätzliches Problem dar. Auch erfordert die Verdichtung eine höhere Energiezufuhr und ein wesentlich intensiveres Rütteln als bei Normalbeton, da die Auflast aus Eigengewicht geringer ist. Demgegenüber ist das Einbringen von Leichtbeton in liegende Schalungen leichter durch-

zuführen; dies betrifft ebenso das Verteilen wie das Abziehen der Oberflächen. In liegender Schalung sollte indes nicht zu weicher Beton verarbeitet werden, da sich mehr Feinmörtel an der Schalungsfläche sammeln kann, der das Schwinden fördert und eine Netzrisbildung verstärkt.<sup>38</sup> Aufgrund der geringeren Rohdichte tritt beim Leichtbeton das Grobkorn gegenüber dem Feinmörtel nach oben, was zu Problemen bei der Oberflächenbehandlung führen kann. Mit geeigneten Rüttel- und Glättgeräten sowie einer zusätzlichen dünnen Schicht Mörtelmi-

schung kann dies jedoch behoben werden. Beim Pumpen von Leichtbeton können mitunter Schwierigkeiten durch die erhöhte Wasseraufnahme der Zuschlagsstoffe unter dem höheren Druck auftreten. Dadurch wird der Beton steifer, weniger beweglich, und im äußersten Fall unbeweglich, was zu Verstopfungen im Rohrleitungssystem, führen kann.

Der Leichtbeton unterscheidet sich in einer Reihe von baukonstruktiven Eigenschaften vom Normalbeton. Während beim Normalbeton die Kraftableitung vorwiegend über die im

Holzleichtbeton

Ausgangsstoff  
Zement/Beton

Allgemeinen festere Gesteinskörnung erfolgt, stellt beim Leichtbeton (mit dichtem Gefüge) der Mörtel das wesentliche 'Traggerüst' dar, da die Gesteinskörner meist weniger fest und leichter verformbar sind. Die Druckfestigkeit des Leichtbetons hängt wesentlich von der Festigkeit des Zementsteins ab.

Auch die Festigkeitsentwicklung verläuft etwas anders als bei Normalbeton. Nach zunächst ebenso steilem Anstieg verläuft die Kurve, wenn sich die Betonfestigkeit der mit dem jeweiligen Zuschlag erreichbaren Grenzfestigkeit nähert, nur noch sehr flach.

Bei der Zugfestigkeit erreicht der (lufttrockene) Leichtbeton etwa 65 bis 80 % der Werte von Normalbeton; in vielen Fällen kann dieser Nachteil durch die größere Elastizität ausgeglichen werden. Leichtbeton weist in jedem Fall eine geringere Kantenfestigkeit auf.

Der Elastizitätsmodul ist niedriger, das heißt dass sich Leichtbetonbauteile bei gleicher Beanspruchung stärker verformen als Bauteile aus Normalbeton.<sup>39</sup> Der Elastizitätsmodul von Beton ist vorwiegend von der Rohdichte und zum Teil von der Festigkeit abhängig.

Das Kriech- und Schwindverhalten bestimmen maßgeblich der Zementleimgehalt. Je nach verwendetem Material kann ein etwas stärkeres Schwindverhalten auftreten. Während die Wasseraufnahme von Leichtbeton je nach Zuschlag in der Regel etwas höher ausfällt als bei Normalbeton, sind bei der Wasserundurchlässigkeit keine nennenswerten Unterschiede festzustellen. So kann man durchaus Wasserbehälter aus Leichtbeton herstellen; auch die Frost- und Tausalzbeständigkeit entspricht der von Normalbeton.

Der Wärmeschutz wird maßgeblich von der Rohdichte des Leichtbetons bestimmt, das heißt niedrige Rohdichten ergeben niedrige Wärmeleitzahlen und somit einen besseren Wärmeschutz. Neben der Rohdichte nimmt

noch die mineralogische Zusammensetzung der Gesteinskörnung auf die Wärmedämmeigenschaften Einfluss.

Der Feuchtigkeitsgehalt und das Verhalten gegen Feuchtigkeit beeinflusst die Wärmeleitfähigkeit des Betons. Daher sollte bei der Betonherstellung ein Beton angestrebt werden, der im Gebrauchszustand möglichst wenig Wasser enthält beziehungsweise beim Einbau ein ausreichendes Austrocknen gewährleistet sein.

Die Dampfdurchlässigkeit hängt von der Dichtigkeit des Gefüges ab. Während haufwerkporige Betone sehr dampfdurchlässig sind, erreichen gefügedichte Leichtbetone einen Diffusionswiderstand von Normalbeton. Bei allen Betonen stellt sich nach mehreren Jahren ein 'Gleichgewicht' im Feuchtegehalt ein.

Der Luftschallschutz hängt in erster Linie von dem Flächengewicht der Bauteile ab. Da dieses bei Leichtbeton bei gleicher Bauteildicke geringer ist als bei Normalbeton fällt auch der Luftschallschutz geringer aus. Ausreichender Körper- und Trittschallschutz kann in der Regel nur mit mehrschichtigen Aufbauten erzielt werden.

### Anmerkungen

- 1 Dieser ist bisher nicht rechtlich geschützt.
- 2 Schubert, 1991
- 3 Vgl. Meyers Großes Taschenlexikon, Bd. 10, 2/1987, S. 54f., 57, 61
- 4 Vgl. Charisius, 1947, S. 6
- 5 Vgl. Beraus, 2001, S. 103-109
- 6 Vgl. Hummel, 10/1948, S. 201-204. In späteren Ausgaben spricht er nur mehr von "Sägespänebeton". Hummel, 12/1959, S. 266
- 7 Vgl. Charisius, 1947, S. 3, 6
- 8 Vgl. DIN EN 206-1, Juli 2001 - Beton, S. 11
- 9 Vgl. Charisius, 1947, S. 7
- 10 Der Holzleichtbeton sei mit einer Rohdichte von 600 kg/m<sup>3</sup> im Gegensatz zum Holzbeton etwas leichter; Tel. mit Herrn Prof. Natterer, 11.07.2000
- 11 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 11ff.
- 12 Vgl. Cerliani/Baggenstos, 2000
- 13 Vgl. Cerliani/Baggenstos, 2000, S. 19

- 14 Vgl. Krippner, 20.11.2002
- 15 Vgl. Meyers Großes Taschenlexikon, Bd. 10, 2/1987, S. 51
- 16 Vgl. Natterer et al., 2/1996, S. 34
- 17 Vgl. Natterer et al., 2/1996, S. 34ff.
- 18 So sind die Formänderungen "in tangentialer Richtung am größten, in radialer Richtung ... nur etwa halb so groß und in Längsrichtung vernachlässigbar klein. Vgl. Kolb, 2/1992, S. 41
- 19 Für zentralbeheizte, wärmegeämmte Räume wird mit einer durchschnittlichen Holzfeuchte von etwa 9 % gerechnet. Vgl. Kolb, 2/1992, S. 45
- 20 Zellulose 40 - 50 %, Holzpolyosen 20 - 30 %, Lignin 20 - 30 %
- 21 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 16-18
- 22 Der Bruttopreis für Holzreststoffe schwankt zwischen etwa 10 und 200 €/t (Darrgewicht). Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 17
- 23 Für Österreich beträgt dieses Gesamtpotenzial etwa 3,5 mio t/a (1988). Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 16
- 24 Vgl. Schubert, 1991
- 25 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 20
- 26 Vgl. Meyers Großes Taschenlexikon, Bd. 3, 2/1987, S. 197; Kind-Barkauskas et al., 1995, S. 45
- 27 Vgl. Meyers Großes Taschenlexikon, Bd. 24, 2/1987, S. 268
- 28 Der W/Z-Wert bezeichnet den Anteil Wasser und Zement im Beton; 1000 kg Beton weisen einen W/Z-Wert von 0,5 auf, wenn 500 kg Wasser und 500 kg Zement zugegeben werden.
- 29 Vgl. Kind-Barkauskas et al., 1995, S. 45-60
- 30 Z.B. Ausbreitklassen F1 (steif), F2 (plastisch), F3 (weich, eine Art Regelkonsistenz), F4 (sehr weich), F5 (fließfähig), F6 (sehr fließfähig). Vgl. Ebeling et al., 14/2002, S. 32
- 31 Das entspricht den Expositionsklassen XC4 und XF1, d.h. der verwendete Beton muss die Festigkeitsklasse  $\geq$  C25/30 und einen Zementgehalt  $\geq$  280 kg/m<sup>3</sup> aufweisen.
- 32 Je nach Anforderung wird bei der Herstellung und Verarbeitung von Beton ein abgestuftes Qualitätsmanagement erforderlich, das aus werkseigener Produktionskontrolle und Fremdüberwachung besteht. Vgl. Kling/Peck, 4/2003, S. 170-176
- 33 Vgl. Ebeling et al., 14/2002, S. 24-28
- 34 Vgl. Aurich, 1971
- 35 Auch als Konstruktionsleichtbeton, Stahlleichtbeton und Spannleichtbeton bezeichnet. Vgl. Aurich, 1971, S. 7f.
- 36 Aurich, 1971, S. 14
- 37 Vgl. Aurich, 1971, S. 15ff.
- 38 Daher wird neben Rütteltischen und Rüttelböcken sowie Schalungsrüttlern der Einsatz von Oberflächenrüttlern empfohlen. Vgl. Aurich, 1971, S. 111ff.
- 39 Dies ist vor allem bei weit gespannten Bauteilen von Bedeutung. Vgl. Aurich, 1971, S. 145

## 4 Vom Steinholz zum Holzleichtbeton

Die Kombination von anorganischen Baurohstoffen mit Restholz aus der Holzbearbeitung ist keine Neuentwicklung, sondern lässt sich bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts zurückverfolgen. Unter Bezeichnungen wie "Steinholz", "Sägemehlbeton" oder "Holzbeton" existieren eine Reihe von Anwendungen, vor allem als Fußbodenestriche und Putze.

Anfang der 1930er Jahre werden mit der Patentierung von einschlägigen Verfahren die Grundlagen zur Herstellung von "Holzspanbeton" geschaffen, der sich vor allem in Österreich unter den Produktnamen "Holzspan-Mantelstein" und "Holzspan-Mantelbetonplatte" am Baumarkt etabliert.

Nach dem Zweiten Weltkrieg experimentiert man in Deutschland aufgrund von Baustoffmangel mit Zement gebundenen Holzwerkstoffen und Ende der 60er Jahre greift man in der Deutschen Demokratischen Republik diesen Ansatz für einen kostengünstigen Kleinwohnungsbau sowie für landwirtschaftliche Bauten zeitweise wieder auf.

Beim Blick zurück wird eine spannende 'Genese' sichtbar, die verstreut in einer Vielzahl von Fachpublikationen dokumentiert ist. Neben einer zusammenfassenden Darstellung wesentlicher Entwicklungsschritte, anhand derer sich die unterschiedlichen stofflichen und herstellungstechnischen Ansätze aufzeigen lassen, spiegelt ein solcher Abriss ebenfalls die wechselvolle Geschichte von Begriffsdefinitionen und Produktnamen, welche im übrigen bis heute unvermindert weiter geht.

Nachfolgend wird die Entwicklung des Verbunds von anorganischen Bindemitteln und organischen Zuschlagsstoffen im Wesentlichen in den drei Abschnitten behandelt:

- Anfänge – Frühe Experimente
- Steinholz sowie Holzbeton
- Aktuelle Produkte und Systeme

### 4.1 Anfänge – Frühe Experimente

Die Ursprünge des Steinholzes, eines Gemisches aus Magnesiaazement, also gebranntem Magnesit, versetzt mit Chlormagnesium, unter Beimischung organischer Substanzen wie Holzmehl und Sägespäne, reichen zurück bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts.

Nach ersten Versuchen mit Zinkoxyd und starken Chlorzinklösungen (Mitte/Ende 1850) experimentiert der französische Zivilingenieur Stanislaus Sorel 1867 mit Mischungen aus Magnesiumoxyd und konzentrierten Magnesiumchloridlösungen und entdeckt interessante Mörtel Eigenschaften. Für die so gewonnene erhärtete Masse (Magnesiumzement) untersucht er eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten. Das Material lässt sich beliebig färben und durch Zusatzstoffe wie Schmirgelpulver beziehungsweise Schleifsteinpartikel und elastische Substanzen bereits als Fußbodenmaterial einsetzen.

Erst etwa 20 Jahre später wird dieser "Sorelmörtel", der in hohem Maße organische Füllstoffe zu einem Produkt von geringer Längenänderung und hohen Festigkeiten verbinden konnte, auch zur Anwendung gebracht. Trotz erster Ansätze einer industriellen Verwertung, auch unter der Bezeichnung "Sorelscher Zement" in Boston, kann sich das Material nicht entscheidend durchsetzen.<sup>1</sup>

Um 1890 wird das Verfahren wieder aufgegriffen und gezielt verbessert. In der ersten Hälfte der 90er Jahre werden Fußbodenplatten gefertigt, die aus einer unter hohem hydraulischem Druck verarbeiteten Mischung von Magnesiumoxyd, Magnesiumchloridlösung und Sägespänen bestehen. Etwa um 1895 setzt man erste fugenlose "Sorelmörtel-Beläge" ein. Cordes subsumiert unter diesem Begriff die handelsüblichen Produktnamen

Vom Steinholz zum Holzleichtbeton

Anfänge – Frühe Experimente

Vom Steinholz zum  
Holzleichtbeton

Anfänge – Frühe  
Experimente

“Steinholz” und “Derma”.<sup>2</sup>

Eine Vielzahl ausgestellter Patente und die Gründung von Steinholzfabriken spiegeln den neugewonnenen Stellenwert des Materials. Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts zeigen verschiedene Komposite aus organischen Füllstoffen mit anorganischen Bindemitteln die breitangelegten Versuche. Die Materialkombinationen unterscheiden sich vor allem durch den Herstellungsprozess.

#### 4.1.1 Steinartige Masse aus Sägemehl und Gips oder Zement<sup>3</sup>

Nachdem den frühen Versuchen “Holzmehl für die Herstellung von Baumaterialien zu verwenden” kein baupraktischer Erfolg beschieden ist, gilt im Zuge der Weiterentwicklungsbemühungen besonders der Vorbehandlung des organischen Zuschlagsstoffes das Hauptaugenmerk, zur Verbesserung der Verbindung zwischen Sägemehl und Bindemittel (Gips, Zement).

Mit einer Art “Imprägnierung” experimentiert man zur Erhöhung der Adhäsion und zur Verminderung der Feuchtigkeitsaufnahme der Holzteilchen wie auch von deren Brennbarkeit; dies führt nach Scherer bereits zu Ergebnissen für ein “vorzügliches und brauchbares Material”. Als Mischungsverhältnis werden “2/3 Sägemehl und 1/3 Gips oder Zement” vorgeschlagen.

Die Herstellung erfolgt in einem dreistufigen Verfahren. Das Sägemehl wird mit Wasserglas und Zusatz von Asbestpulver sowie geringen Mengen Leim längere Zeit eingekocht, damit auch die kleinsten Teile des Gemischs vollständig mit Wasserglas durchsetzt sind. Je nach Anwendungszweck können der Mischung nach dem Kochen weitere Zusätze (Sand, Teer, Goudron, Asphalt) beigegeben werden. Das derart aufbereitete Sägemehl wird mit Gips oder Zement vermischt und in eine vorbereitete Form gebracht.

Für die Herstellung des Materials ist ein “Glüh- und Trockenprozess” wichtig. Der organische Zuschlagsstoff erfordert zudem eine Vorbehandlung gegen “verkohlen”. Nach dem Erhärten werden die Elemente (Platten etc.) zunächst gebrannt und anschließend in einem speziellen Ofen luftgetrocknet. Das Material wird als leicht und dicht sowie ‘diffusionsgeschlossen’ charakterisiert. Mit dem Zusatz von Wasserglas und Asbestpulver gilt es als feuersicher, schalldämmend und für elektrische Isolationszwecke geeignet. Es lässt sich gut bearbeiten, zum Beispiel nageln. Aufgrund der Festigkeiten stuft man etwaige Abnutzungen als gering ein. Anwendungsbereiche sind vornehmlich Fußbodenbeläge und Pflastersteine.

#### 4.1.2 Baumaterial aus Gips und Sägespänen<sup>4</sup>

Die Herstellung eines Materialgemisches aus Sägemehl, Lohe, Torfmull und Gips ist nach Scherer bereits Anfang des 19. Jahrhunderts bekannt. Die organischen Füllstoffe und der Gips werden mit Wasser zu einer breiigen Masse vermischt und entweder in Formen gegossen oder als Spritzbewurf verwendet. Allerdings zeigen sich aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Gewichte inhomogene Verteilungen und ein zu rasches Abbinden des Gipses. Inwieweit das Material als Platten oder Tafeln zum Wärme- und Feuchteschutz oder in Form von Mauersteinen Einsatz findet, bleibt offen.

Einen anderen technischen Ansatz stellt die Pressung dar. Angefeuchtete Sägespäne werden mit gesiebtem Gips bestreut, das Gemisch anschließend in entsprechend gewünschte Formen eingebracht und mehr oder minder stark verpresst, wodurch die Zuführung von Wasser erfolgt. Die Dichtigkeit des Materials kann anhand des Pressdrucks vari-

iert werden, eine Option, die bei gegossenen Steinen nicht möglich war. Das Kompositmaterial wird aufgrund der gleichmäßigen Umhüllung der organischen Teilchen als “absolut feuersicher” eingestuft. Für die Herstellung einer festen, homogenen Masse genügt bereits ein Gips-Gewichtsanteil von einem Viertel. Das Material zeigt gute Bearbeitungseigenschaften, lässt sich leicht nageln beziehungsweise schrauben und sägen. Das fertige Produkt weist eine körnige Oberflächenstruktur auf und gleicht je nach Zusatzstoffen feinkörnigem Sandstein beziehungsweise Granit. Scherer stellt heraus, dass durch einen entsprechenden Anstrich eine “täuschende Imitation” dieser Natursteine erzielt werden kann. Daher diskutiert man auch Einsatzmöglichkeiten als Dekorationselement für den Innenausbau und für Zeltbauten.

#### 4.1.3 Kunststeinplatten aus Magnesit<sup>5</sup>

Bereits um 1900 ist die Herstellung von Materialien für Dielen und Wände mit weiteren organischen Füllstoffen bekannt. Gebranntem Magnesit wird Chlormagnesium beigegeben und das Gemisch unter anderem mit Holzspänen, Korkabfällen, Torf sowie mit kieselaurer Magnesia beziehungsweise freier Kieselsäure versetzt.

Zur Herstellung von Bauteilen, wie Formsteinen bringt man das Materialgemisch in eine Form ein. Nach mehrwöchigem Abbinden werden die fertigen Steine in eine Wasserglaslösung getaucht.



## 4.2 Steinholz

Vor allem in den 1920er Jahren, nach einer gewissen Konsolidierung der Bauindustrie, erfährt das Steinholz, einerseits aufgrund knapper Ressourcen, andererseits wegen reicher Vorkommen an Magnesit in den schlesischen Gruben, eine Renaissance in Deutschland.<sup>6</sup> Dies spiegelt auch der Zusammenschluss eines Großteils der Steinholzhersteller zu dem Verband Deutscher Steinholzfabrikanten e.V., kurz «Vastei», wider, der nach dem Ersten Weltkrieg einen bedeutenden Industriezweig darstellt.

### 4.2.1 Magnesia-Estrich<sup>7</sup>

Magnesia-Estriche werden aus gebrannten Magnesiten ( $MgCO_3$ ) und Magnesiumchloridlösung, das heißt Magnesit und Lauge, beziehungsweise kaustischer Magnesia ( $MgO$ ) und einer wässrigen Magnesiumsalzlösung ( $MgCl_2$ ,  $MgSO_4$ ) hergestellt. In diesen Estrichen sind neben anorganischen Füllstoffen (Quarzmehl, Quarzsand, Asbest, Talkum, Bimsmehl, Korund, Siliciumcarbid) auch organische Zusätze (Sägemehl und -späne, Papiermehl, Korkschröt und -mehl, aber auch Textil- und Gummifasern, Lederabfälle) enthalten; gegebenenfalls werden weitere Zusätze wie Pigmente zum Einfärben hinzugeben. Das Mischungsverhältnis soll nach Gewichtsteilen (GT) von wasserfreiem Magnesiumchlorid zu Magnesiumoxid für Unterschichten bei 1 : 2 bis 3,5 liegen; für die Ober-, das heißt die Verschleiß- beziehungsweise Nutzungsschicht etwa 1 : 2,5 bis 3,5 betragen. Der Estrich gilt bereits nach zwei Tagen als begehbar.

Der Belag wird in drei Konstruktionsarten "als Verbundestrich, als Estrich auf einer Trennschicht und als schwimmender Estrich" meist

in ein oder mehreren Lagen hergestellt. Durch Art und Menge der Zusatzstoffe lässt sich die Qualität beeinflussen und die Eigenschaften besonders hinsichtlich der Wärmedämmung und Härte beziehungsweise Verschleißfestigkeit verbessern; das Material gilt als elastisch und fußwarm.

Probleme bereitet die durch die Magnesiumchloridlauge erhöhte Korrosionsanfälligkeit von eingelegten Stahlteilen auch der darunter liegenden Decken. Daher ist Magnesia-Estrich über Spannbetondecken nicht zugelassen. Ferner erfordert der Estrich einen guten Schutz gegen Feuchtigkeit (keine Verwendung im Freien und in Feuchträumen) sowie eine intensive Pflege, da dieser sonst leicht spröde wird.<sup>8</sup>

Magnesia-Estriche werden bei Rohdichten bis  $1600 \text{ kg/m}^3$  in Festigkeitsklassen zwischen 5 und  $50 \text{ N/mm}^2$  eingeteilt.<sup>9</sup> Viele dieser Fußbodenbeläge sind unter dem Sammelbegriff "Steinholz" subsumiert oder man nennt sie Steinholz-Estrich.

### 4.2.2 Steinholz oder Xylolith<sup>10</sup>

Als Steinholz oder Xylolith bezeichnet man eine plastische Masse aus Magnesiamörtel und Sägemehl, die nach der Erhärtung sowohl eine steinartige Beschaffenheit als auch Eigenschaften des Holzes aufweist. Fasse beschreibt Steinholz seinen Grundformen nach als chemisches Produkt, das sich in der praktischen Handhabung wie Holz bearbeiten lässt.<sup>11</sup> Cordes sieht darin einen "Baustoff, der aus einem innigen, anfänglich weichen, formbaren, später erhärtetem Gemenge aus gemahlener kaustischer Magnesia<sup>12</sup>, Magnesiumchloridlauge und organischen und anorganischen Füllstoffen entsteht".<sup>13</sup>

Es gibt in den darauf folgenden Jahren eine Vielzahl von Versuchen die Steinholzeigenschaften zu verbessern. Die Beimengung einer chlormagnesiumbeständigen, wässrigen

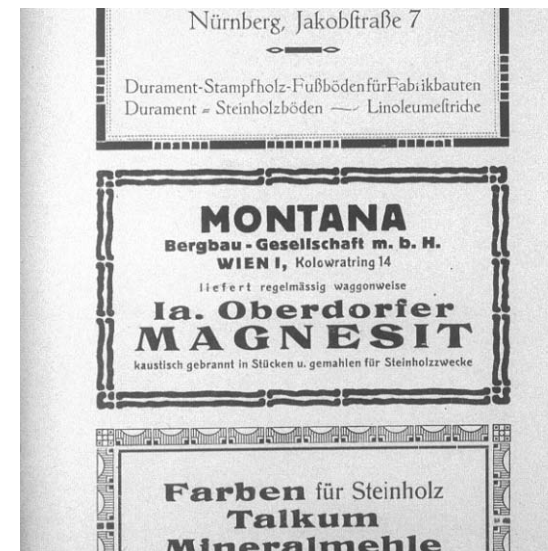
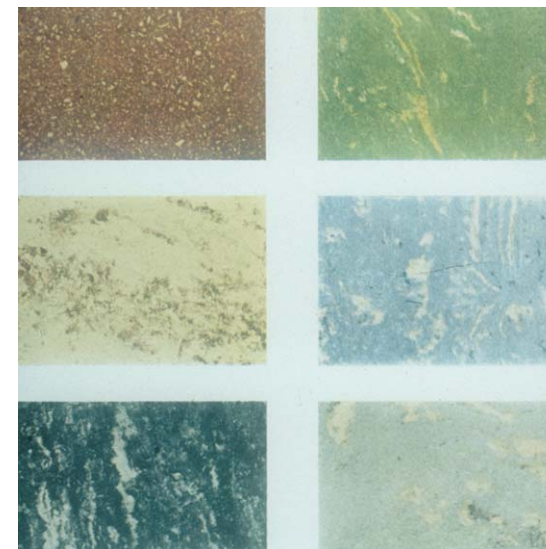


Abb. 4.1 Werbung für Steinholzprodukte

Abb. 4.2 Farbpalette unterschiedlicher Steinholzböden. "Steinholz ist der ideale Fußboden für jeden Zweck" (1956)



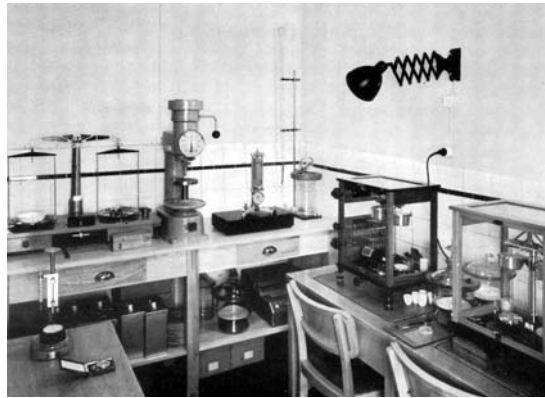
Vom Steinholz zum  
Holzleichtbeton

Steinholz

Vom Steinholz zum  
Holzleichtbeton

Steinholz

Steinholz	
Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	27,5 - 35
Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	4 - 5,5
Gewicht nass [kg/m <sup>2</sup> ]	≈ 20
Gewicht trocken [kg/m <sup>2</sup> ]	≈ 19



Asphaltemulsion führt zu einem neuartigen Produkt für fugenlose "Sorelmörtel-Beläge", das unter "Derma-Brand-Emulsion" beziehungsweise "Derma-Beläge" am Markt erhältlich ist.<sup>14</sup> Das Material kann als Fußbodenbelag eingesetzt und als Estrich vergossen wie auch in Platten gepresst werden. Scherer betont eine begriffliche Differenzierung und bezeichnet den Steinholz-Estrich als "Steinholz", während er unter "Xyolith" (wörtlich "Holzstein") die Steinholz-Platten zusammenfasst. Der ebenfalls häufig gebrauchte Ausdruck "Kunstholz" ist dagegen seiner Meinung nach irreführend, da es sich bei dem Material nicht um ein Holzimitat handelt. Als Vorteile des Steinholzes gelten Dauerhaftigkeit und Feuersicherheit;<sup>15</sup> ferner werden die elastischen und wärmedämmenden Eigenschaften herausgestellt. Insbesondere durch die Robustheit des Materials und die Möglichkeit einer leichten, feuchten Reinigung gilt das Steinholz für hohe hygienische Anforderungen an Bodenbeläge als geeignet (Krankenhäusern, Sanatorien, Bädern und Küchen). Nach Scherer verbindet das Material die Vorteile von Steinböden (hart und glänzend) und Holzböden (elastisch und wärmer), es sei angenehm zu begehen und wirke schalldämpfend. Allerdings werden die Fußbodenbeläge mit organischen Beimengungen als nicht wetterbeständig und daher nur für ei-

Abb. 4.3 Kennwerte für "normales" Steinholz (Vgl. Fasse, 1923, S. 14f.)

Abb. 4.4 Blick in ein Laboratorium des Fachvereins Steinholz, Bonn (1956)

Abb. 4.5 Steinholzfußboden in einem Büroraum, doppelschichtig und zweifarbig mit maschinellem Fugenschnitt (1956)

nen Einsatz im Innenraum als zweckmäßig eingestuft.

Für das Steinholz stehen je nach Anwendungszweck, Beanspruchung und angestrebtem Aussehen neben dem Holz (Sägemehl, Sägespäne, gemahlene Baumrinden, bevorzugt aus Weichholz, Tanne)<sup>16</sup> eine Fülle weiterer Zusatzstoffe zur Auswahl: Zu den bekanntesten zählen Asbestfasern, -pulver, Korkgries oder -mehl, gehacktes Stroh; weniger häufig werden Kieselgur, Terpentin, Schammottemehl, Asche, Federweiß, Torf verwendet. Mit dem Anteil der organischen und/oder mineralischen Substanzen ist das Aussehen des Bodenbelags (mehr Holz oder mehr Stein) gut zu beeinflussen. Steinholzböden werden meist eingefärbt; zur Verfügung stehen Erdfarben und Metalloxyde, für weiße Beläge setzt man Federweiß oder Kreide ein.<sup>17</sup> Der Steinholzbelag wird je nach Unterboden ein- beziehungsweise zweischichtig mit einer durchschnittlichen Höhe von 10 bis 14 mm ausgeführt. Zur besseren Verbindung insbesondere mit Holzböden werden (halb-)eingeschlagene Nägel beziehungsweise Drahtnetze aufgebracht. Auch werden die organischen Zusatzstoffe vor dem Einsatz meist mit Wasser gesättigt.<sup>18</sup>

Fasse sieht in dem Steinholz einen "kräfte- und zeitsparenden [das heißt im Vergleich mit anderen Belagsarten wirtschaftlichen, rk] Fabrikbelag, der allen Anforderungen restlos entspricht".<sup>19</sup> (Abb. 4.3)

Der Fachverein Steinholz e.V., (Abb. 4.4) eine Vereinigung von Fachfirmen aus dem Steinholzverleggewerbe unterscheidet noch in den 1950er Jahren vier Arten der Herstellung von Steinholzbelägen.<sup>20</sup> Die Oberflächenbehandlung erfolgt zunächst durch Glattstreichen mittels Verputzbrett und Glättkelle. In einem zweiten Schritt befreit man die verbliebenen Unebenheiten durch Glattschaben be-

ziehungsweise Hobeln. Dann werden die Flächen mit Lein- oder Fußbodenölen mehrmals überstrichen. Durch Einlassen von Wachsterepentinlösung können die Oberflächen nachträglich noch poliert werden.<sup>21</sup> (Abb. 4.5) Probst nennt bei der Verwendung von Steinholz Boden-, Wand- und Möbelplatten, die auch werksmäßig hergestellt werden können.<sup>22</sup> Für Wandbekleidungen ist zur Aufnahme von Steinholz eine Vorbehandlung erforderlich. Fasse empfiehlt einen Zementrauhstrich sowie bei Holzwänden ein dünnes Wellblech mit Asphaltanstrich oder eine Art Drahtgeflecht.<sup>23</sup> Neben Möglichkeiten der Herstellung von Terrazzo-, Mosaik- und Marmorimitationen eignet sich Steinholz durch freies Auftragen ebenfalls zum Nacharbeiten und zur Ausbildung von Profilstücken.<sup>24</sup>

Anfang des 20. Jahrhunderts werden unter einer Vielzahl von Produktnamen Steinholzbeläge in Plattenform und als Estrich (das heißt als fugenloser Belag) auf den Markt gebracht. Bereits 1903<sup>25</sup> unterscheidet man 30 verschiedene Bezeichnungen, wie Torgament, Linolith, Dresdament, Papyrolith. Erstanwendungen erfolgen ab 1893 und 1938 erreicht man bereits eine Fläche von 5,5 Millionen m<sup>2</sup> verlegtes Steinholz.<sup>26</sup>

Eines der bekanntesten Produkte ist Xyloolith<sup>27</sup>, das ebenfalls unter einem hohem hydraulischen Druck aus Holzmasse und mineralischen Stoffen hergestellt wird. Aufgrund der daraus resultierenden dichten, faserigen Verbindung weist Xyloolith eine hohe Widerstandsfestigkeit auf und zeigt im praktischen Gebrauch eine doppelt so hohe Widerstandsfähigkeit wie Eichenholz.<sup>28</sup> Endapedon ist dagegen ein Gemisch aus Magnesit und vorbehandelten Sägespänen beziehungsweise Magnesit und Speckstein und Holzschliff, das man vor Ort kalt mischt und einbringt.<sup>29</sup>

### 4.3 Holzbeton

#### 4.3.1 Stand der Forschung um 1950

Ansätze zur Optimierung der Kombination von anorganischen Baurohstoffen mit Restholz, vor allem Verbesserung von Feuchtebeständigkeit und Vermeidung der Korrosionsproblematik, führen zu Experimenten mit Holzbeton. Das erste Produkt ist ein so genannter "Sägemehlbeton" auf Basis von Portlandzement. (Abb. 4.6) Hummel benennt statt des übergeordneten Terminus "Holzbeton" die Betone aus organischen Stoffen nach dem Zuschlagsmaterial, zum Beispiel als Sägemehlbeton.<sup>30</sup> Charisius grenzt Holzbeton von Holz bewehrten Beton deutlich ab, der mit letzterem "im strengen Sinn des Wortes nichts zu tun" habe. Bei diesem wird zur Aufnahme der Zug- und Schubspannungen anstelle von Stahleinlagen Holz als Bewehrung verwendet. Bereits 1919<sup>31</sup> werden erste Erfahrungen mit Holz zur Bewehrung von Beton gesammelt.<sup>32</sup>

Als Bindemittel verwendet man für den Holzbeton Zement. Hinsichtlich des Einflusses unterschiedlicher Zementarten sind kaum Unterschiede festgestellt worden. Es gilt als zweckmäßig für eine rasche Abbindung und Erhärtung insbesondere der Fertigteile hochwertigere Zemente zu verwenden.<sup>33</sup>

Füllstoffe sind zunächst – per Definition – Holzspäne (Hobel- beziehungsweise Sägespäne) und Sägemehl. Charisius sieht allerdings auch die Möglichkeit der Verwendung von Korkmehl beziehungsweise -schrott und anderen faserartigen Materialien, wie Stroh, Schilf, Torfmull.

Für die Zuschlagsstoffe aus Holz eignen sich vor allem die Weichholzarten Kiefer, Fichte und Tanne; ferner werden auch Buchen- und

Ahornabfälle als brauchbar eingestuft. Bei Spänen aus Eiche ergeben sich aufgrund der höheren Festigkeit Probleme beim Verbund; der hohe Gehalt an Gerbsäure wirkt sich ebenfalls nachteilig aus. Es sollen in jedem Fall nur gut getrocknete Mehle beziehungsweise Späne verwendet werden, die keinen Gehalt an frischem Harz aufweisen.

Als weitere Füllstoffe eignen sich aufgrund der guten Verträglichkeit mit Zement Naturbimssand oder Hüttenbims; Quarzsand dagegen erhöht die Wärmeleitfähigkeit. Darüber hinaus können auch Gesteinsmehle etc. zugegeben werden, deren Anteil zu begrenzen ist.<sup>34</sup>

Alle in der Natur vorkommenden Wasserarten (Härtegrade etc.), wie auch Quell- und Regenwasser werden für das Zugabewasser als geeignet eingestuft. Wasser mit hohem Salzgehalt soll allerdings wegen möglicher Ausblühungen nicht verwandt werden.<sup>35</sup>

Bezüglich einer vorteilhaften Korngröße fehlen Ende der 1940er Jahre noch systematische Versuche. Zementanteil und Wasserbedarf bestimmen maßgeblich die Korngröße des verwendeten organischen Materials. Daher sollen Feinstmehle nur in geringen Mengen verarbeitet werden, da diese erhebliche Zementzusätze erfordern und den Wasseranspruch erhöhen.<sup>36</sup> Dies wiederum kann sich auf Saugfähigkeit und Volumenänderung negativ auswirken, die Festigkeit beeinträchtigen sowie das Schwindverhalten erhöhen.

Die Herstellung von Holzbeton erfolgt im Wesentlichen durch Mischung und Wahl der geeigneten Anteile der Ausgangsstoffe Zement, Restholz und Zugabewasser. Im Gegensatz zu Magnesitbinder empfiehlt man bei der Verwendung hydraulischer Bindemittel eine Vorbehandlung der organischen Zuschläge. Charisius behandelt ausführlich die Vorbehandlung des Holzes zur Verbesserung der

Vom Steinholz zum  
Holzleichtbeton

Holzbeton

Vom Steinholz zum  
Holzleichtbeton

Holzbeton

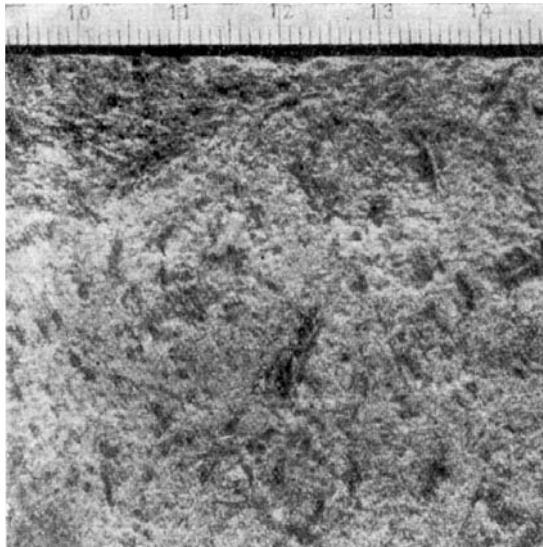


Abb. 4.6 Sägemehlbeton  
(Vgl. Hummel, 10/1948, S. 203)

Oberflächenbindung zwischen Zementleim und organischem Füllstoff sowie zur Verringerung des Schwindens beim Erhärten. Für diesen als Mineralisierung bezeichneten Vorgang haben sich sechs Stoffe als zweckmäßig erwiesen.<sup>37</sup>

Hummel weist daraufhin, dass jedoch über Art und Zweckmäßigkeit einer Vorbehandlung eine Fülle sich zum Teil widersprechender Meinungen bestehen. Eine Vorbehandlung kann unterbleiben, wenn der Anteil der organischen Stoffe verhältnismäßig gering ist. Man unterscheidet zwei Vorgehensweisen:<sup>38</sup>

- Oberflächenveränderung zur Verbesserung der Haftung der Zementpaste (des Zementleims) an den Holzspänen
- Durchtränkung mit wasserabweisenden Stoffen oder oberflächliches beziehungsweise durchgehendes Mineralisieren des organischen Zuschlags; das "Mineralisie-

ren nach der Tiefe" hat meist eine Gewichtserhöhung und Verringerung der Plasizität und Dehnungsfähigkeit zur Folge.

Nach der Vorbehandlung<sup>39</sup> werden die Zuschlagsstoffe in der Regel ausgebreitet und getrocknet, anschließend mit Zement vermischt und verarbeitet. Nur beim Mineralisieren mit Zementmilch kann auf das Vortrocknen verzichtet werden, wenn der Beton durch Pressung verdichtet wird; die Zementmilch dient dann gleichzeitig als Bindemittel. Die dem Einbringen in die Form nachfolgende Verdichtung ist für die Eigenschaften des Produkts von großer Bedeutung; für eine Schüttung ohne weitere Nachbearbeitung gilt das Kompositmaterial als ungeeignet. Es erfordert je nach Bauteilanforderung und Betriebsgröße Stampfen von Hand, Rütteln oder Maschinenpressung.<sup>40</sup>

Die Verdichtung erfolgt durch (Druck-)Pressen oder Stampfen (mit eventuell nachfolgendem Beschweren). Bei Rohdichten zwischen 800 und 1500 kg/m<sup>3</sup> werden durch Pressung Betondruckfestigkeiten<sup>41</sup> von bis zu 25 N/mm<sup>2</sup> erzielt; nach Hummel sind die für gewöhnliche Wandbetone ( $\rho = 500$  bis 1100 kg/m<sup>3</sup>) erforderlichen Druckfestigkeiten auch durch Stampfen zu erreichen.

Holzbetone gelten auch als äußerst elastisch und wärmedämmend; allerdings stellt das starke Schwindverhalten (bis zu 6 mm/m) bereits damals ein großes Problem dar. Dies erfordert mitunter lange Lagerzeiten vor dem Einbau als Platte oder Formstein.

Zu einer Holzbeton-Rezeptur aus 1 Volumeneinheit (VE) Zement und 4 VE Kiefern-sägemehl stellte Hummel einige Kennwerte vor. Bei dieser Mischung wird das Mehl mit Tonbrühe vorbehandelt und die Masse bei schwach plastischer Verarbeitung von Hand gestampft. (Abb. 4.7)

Auch wenn Ende der 1940er Jahre nur wenige Ergebnisse aus systematischen Untersuchungen vorliegen,<sup>42</sup> skizziert Charisius bereits Angaben zum W/Z-Wert, der je nach Füllstoff und Herstellungsverfahren durch Versuche zu ermitteln sei. Aufgrund der Saugfähigkeit des Holzes soll jedoch der Wasseranteil nicht zu knapp bemessen sein. Hinsichtlich der Herstellung von Holzbeton gilt eine halbplastische Konsistenz des Frischbetons für die Eigenschaften des Bauteils von Vorteil.<sup>43</sup> Für die weiteren Schritte, Verdichten, Entformen, Lagerung sind im Grunde genommen die gleichen Maßnahmen zu treffen wie bei der 'klassischen' Betonherstellung.

Die Rohdichte (Raumgewicht) ist abhängig von den Füllstoffen, der gewählten Steife des Frischbetons sowie dem Verdichtungsgrad. Der Rohdichtebereich von Holzbeton wird von Charisius zwischen 500 und 1500 kg/m<sup>3</sup> angegeben.<sup>44</sup>

Bei Untersuchungen zur Biegezugfestigkeit von Holzbetonplatten liegen die ermittelten Werte bei etwa 20 kg/cm<sup>2</sup>. Eine Abhängigkeit von der Rohdichte kann nicht festgestellt werden, da vor allem die Art der Zusammensetzung und der Strukturaufbau des Betons diese bestimmen.

Hinsichtlich der Druckfestigkeiten zeigen die Versuchsergebnisse große Schwankungen. Bei gestampfter Verarbeitung von Hand können Werte von 7 N/mm<sup>2</sup> (nach 56 Tagen) und bei maschineller Verdichtung bis zu 250 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Elastizitätsmessungen ergeben Werte zwischen 2.210 und 2.620 N/mm<sup>2</sup>, während Hummel für Holzbeton einen (Druck-)E-Modul von 3.000 N/mm<sup>2</sup> ansetzt.<sup>45</sup>

Charisius spricht neben den Vorzügen von Holzbeton auch von "unstreitbar gewissen Nachteilen". Bezüglich des Schwindens und

Quellens betont er die besondere Schwindneigung des Holzbetons als "bedenkliche Eigenschaft", die sowohl bereits nach der Herstellung als auch im verbauten Zustand zu Formänderungen führen kann. Systematische Untersuchungen zum Einfluss von Mischungsverhältnissen und Herstellungsart auf das Schwinden und Quellen gibt es damals noch nicht.<sup>46</sup>

Auch für die Witterungsbeständigkeit fehlen Ende der 1940er Jahre detaillierte Untersuchungsergebnisse. Allgemein wird dem offenen Holzbeton eine größere Feuchtigkeitsaufnahme, mit nachfolgendem Quellen, sowie eine geringere Beständigkeit gegen das Eindringen chemischer Stoffe nachgesagt. Insbesondere der Witterung stärker ausgesetzte Bauteile seien außenseitig durch Putzschichten zu schützen. Insgesamt gelten die gleichen Schutzmaßnahmen wie bei herkömmlichem Beton. Hinsichtlich des Schutzes gegen biologische Einflüsse sieht Charisius Parallelen zu Erfahrungen mit Zement gebundenen Leichtbauplatten, die eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Mikroorganismen zeigen. Dies umso mehr, da Holzbeton in der Regel eine höhere Dichtigkeit aufweist. Bei sachgerechter Herstellung werden keine Unverträglichkeiten von Holzbeton mit anderen Baustoffen erwartet. Einzig in Verbindung mit Gips macht man Einschränkungen geltend.<sup>47</sup>

Die Wärmeleitfähigkeitswerte unterschiedlicher Platten zeigen, dass die Probekörper mit niedriger Rohdichte (650 bis 1600 kg/m<sup>3</sup>) mit einer Wärmeleitfähigkeit<sup>48</sup> von etwa 0,15 bis 0,68 W/mK nahe der von Nadelholz und die schwereren Holzbetone (um 1300 kg/m<sup>3</sup>) bei Leichtbetonen mittleren Gewichts liegen. Die Schalldämmeigenschaften eines Bauteils hängen vor allem von dessen Gewicht ab. Bezüglich der Luftschalldämmung sind poröse, luftdurchlässige Materialien nicht geeig-

net. Für Bauteile aus Holzbeton werden daher nur mehrschichtige Aufbauten als sinnvoll erachtet.<sup>49</sup>

Holzbeton weist aufgrund der Oberflächenmineralisierung der organischen Füllstoffe und dem Anteil an anorganischen Bindemitteln eine höhere Feuerwiderstandsfähigkeit auf als Holz. Allerdings wird Holzbeton, insbesondere bei dünnwandigen Elementen,<sup>50</sup> nicht als feuerhemmend eingestuft und daher empfiehlt man zusätzliche Putzschichten. Hinsichtlich der Eignung als Haftgrund für Putze bestehen keine Einschränkungen. Für Anstriche sind die stofflichen und handwerklichen Maßnahmen wie bei Normalbeton zu wählen. Holzbeton ist nagelbar und sägbar, was besonders bei der Arbeit mit Fertigteilen Vorteile aufweisen kann. Positive Einflüsse hinsichtlich des geringeren Gewichts werden nicht thematisiert.<sup>51</sup> Charisius weist allerdings darauf hin, dass je nach Mineralisierungsvorgang etwaige Korrosionsprobleme bei der Verwendung von Stahlteilen auftreten können.

Insgesamt reklamiert Charisius für den Holzbeton im Dezember 1946 "vielseitige Gebrauchsmöglichkeiten", da mit dieser Leichtbetonart ein Baustoff zur Verfügung steht, der leichte Verarbeitung sowie gute Wärmeschutzeigenschaften aufweist. Für den raschen Wiederaufbau der kriegszerstörten Städte und Gebäude sucht man ein Material, das einerseits lokal beziehungsweise regional verfügbar ist, andererseits sich gut zur Herstellung von Fertigteilen eignet.<sup>52</sup>

### 4.3.2 Forschungsarbeiten in der DDR

Nachdem in der zweiten Hälfte der 40er Jahre, im unmittelbaren Anschluss an das Ende des Zweiten Weltkrieges, Materialknappheit und Ressourceneffizienz zu Arbeiten mit Materialkompositen aus Holz und anorganischen Bindemitteln führen, folgt in der Deutschen De-

Sägemehlbeton	
Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	500–1500
Druckfestigkeit (56 d) [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>1</sup>	7
Druckfestigkeit (56 d) [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>2</sup>	bis 25
Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] <sup>2</sup>	2
(Druck-)E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	2.210 <sup>3</sup> –3000
Schwindverhalten [mm/m]	≤ 6
Wärmeleitfähigkeit [W/mK] (ρ = 650 bis 1600 kg/m <sup>3</sup> )	0,15–0,68
Sorptionsfähigkeit <sup>4</sup> [Vol.-%]	10,4

Abb. 4.7 Versuchsergebnisse von Sägemehlbeton. (Vgl. Hummel, 10/1948, S. 204; Charisius, 1947, S. 12ff.)

<sup>1</sup> Verdichtung durch Stampfen

<sup>2</sup> maschinelle Verdichtung

<sup>3</sup> Charisius, 1947, S. 12ff.

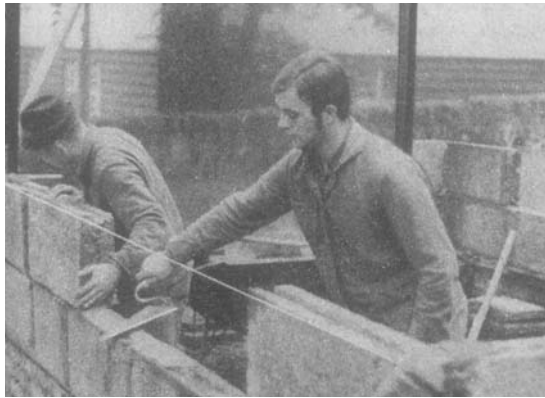
<sup>4</sup> bis nach 28 Tagen

mokratischen Republik eine zweite Phase intensiver Forschungstätigkeiten zum Thema. Seit Ende der 1960er Jahre sucht man im Rahmen einer allgemeinen Erhöhung der Materialökonomie im Bauwesen die "verstärkte Nutzung einheimischer Rohstoffe bei Senkung des spezifischen Energieaufwandes"<sup>53</sup>. Neben einem anvisierten, höheren Holzausnutzungsgrad rechnet man aus einer steigenden Rohholzbereitstellung mit einer erweiterten Nutzungsmöglichkeit für Restholzsortimente, wie Reisig, oberirdische Stockholzabschnitte und anderer Holz- und Rindenabfälle. Verschiedenste Kombinationen mit anderen Baustoffen werden angedacht und für den

Holzbeton

Vom Steinholz zum  
Holzleichtbeton

Holzbeton



Holzbeton eine erfolgreiche Zukunftsperspektive prognostiziert.

Im Rahmen von bauaufsichtlichen Zulassungen<sup>54</sup> wird nach dem damaligen wissenschaftlich-technischen Stand folgende Definition vorgeschlagen: "Holzbeton ist ein tragender Leichtbeton (Rohdichte < 1000 kg/m<sup>3</sup>) aus einem mehr oder weniger stark verdichtetem Gemisch eines mineralischen Bindemittels, in der Regel Zement, mit organischen faserigen Zuschlagstoffen, vornehmlich Holz- und Rindenspäne, dem begrenzte Mengen Abbinde-regler und sonstige Füllstoffe zugesetzt werden können."<sup>55</sup>

Für die Verwertung von rindenhaltigen Holzabfällen (vorzugsweise von Reisig, Schlagabraum und Stockholz) zur Herstellung von Holzbeton gelten neben Fichte und Kiefer auch Birke, Eberesche, Erle, Weide, Pappel und Aspe als gut zu verarbeiten. Während in Anteilen bis zu 20 % Buchenholz und Buchenrinde zugesetzt werden kann, wird Lärche als ungeeignet eingestuft. In Untersuchungen stellt man fest, dass aus diesem Holz "extrahierbare Stoffe" besonders negative Auswirkungen auf die Festigkeit von Holzbeton haben.<sup>56</sup>

Bauelemente aus Holzbeton sind bereits in verschiedenen Formen und Abmessungen auf dem Markt vorhanden beziehungsweise

Abb. 4.8 Holzleichtbeton-Montageelemente (HB-Platten)

Abb. 4.9 Montage nichttragender vorgesetzter Außenwände aus HB-Platten

Abb. 4.10 Holzleichtbetonplatten können unter anderem durch Sägen bearbeitet werden

deren Einführung geplant. In den 1960er Jahren werden in größerem Umfang Fußbodendämmplatten (so genannte FD-Platten, d = 30 mm) eingesetzt und seit 1968 Holzbetonplatten (HB-Platten, d = 120 mm) gefertigt. (Abb. 4.8)

Bis 1971 erfolgt die Herstellung von Dachdämmplatten mit Diffusionskanälen. Ab 1973 plant man die industrielle Produktion von Holzbeton-Schalungssteinen für Mantelbetonwände.<sup>57</sup>

Die Platten beziehungsweise Steine werden jeweils in Handmontage verlegt beziehungsweise versetzt und lassen sich einfach bearbeiten (sägen, bohren, stemmen, fräsen, nageln). (Abb. 4.9+4.10)

Das Restholzsortiment wird zunächst unabhängig von der Faserrichtung mechanisch zerkleinert, zerfasert und fraktioniert. Anschließend erfolgt die Zugabe von Bindemittel und Abbinde-regler und bei geringer Verdichtung die Fertigung der HB-Platten.<sup>58</sup>

Bei Versuchen zur statischen Beanspruchung von Holzbetonwänden (HB-Platten Typ 800) werden Druckfestigkeiten<sup>59</sup> von 12 N/mm<sup>2</sup> (Einzelwert) bis 15 N/mm<sup>2</sup> (Mittelwert) ermittelt; die Werte der Biegezugfestigkeit erreichen fast 50 % der Druckfestigkeit. Ferner werden Belastungsversuche bezüglich der Haftfestigkeit von Schrauben und Nägeln durchgeführt und Mindestabmessungen vorgeschlagen.<sup>60</sup> (Abb. 4.11+4.12)

Bei Brandversuchen zeigt sich, dass die eintretende Verkohlung der Holzpartikel brandhemmend wirkt. Daher erfolgt eine Einstufung der HB-Platten als "schwer brennbar" mit einem Feuerwiderstandswert fw = 1,0.

Bei ausreichenden baukonstruktiven Schutzmaßnahmen und Vermeidung unkontrollierter, starker Durchfeuchtungen (Lagerung und Transport) sind keine schädlichen Auswirkungen

gen zu erwarten. Allerdings gilt es, eine übermäßige Feuchteanreicherung, zum Beispiel durch Kondensatbildung bei der Wasserdampfdiffusion, zu vermeiden. Der Feuchtegehalt beim Einbau und während der Nutzungsphase sollte 18 Masse-Prozent nicht überschreiten.

Bezüglich des Korrosionsverhaltens wird festgestellt, dass von korrosionsfördernden Stoffen besonders Magnesiumchlorid ( $MgCl_2 \cdot 6 H_2O$ ) und Kalziumchlorid ( $CaCl_2$ ) in den HB-Platten enthalten sei. Dies erfordert entweder Korrosionsschutz für Befestigungsmittel und Verankerung oder die Einbringung im Fugenbereich. Diese Stoffe gehen auf Abbinde-regler zurück, die jedoch nur in sehr geringen Mengen anfallen. Auch bei Einwirkungen von (aggressiven) Stalldämpfen werden keine derartigen Schadensbilder festgestellt. Während bei Außenwänden bezüglich der Luftschalldämmung keine Probleme bestehen,<sup>61</sup> zeigen bei Wohnungstrennwänden auch mehrschichtige Aufbauten keinen ausreichenden Schallschutz.

Holzbeton-Platten werden in der Deutschen Demokratischen Republik seit 1968 für verschiedene Bautypen, von Wohn- und Gesellschaftsbauten, über landwirtschaftliche Bauten und Industriehallen bis zu Garagenanlagen eingesetzt, als<sup>62</sup>

- tragende Außen- und Innenwände von eingeschossigen sowie im obersten Stockwerk von mehrgeschossigen Bauten
- nichttragende Außen- und Innenwände
- Ausfachungen im Skelettbau

Im landwirtschaftlichen Bauen<sup>63</sup> werden Holzbetonplatten in vor die Skelettkonstruktion angeordnete Außenwände ( $d = 12 \text{ cm}$ ) eingesetzt; die Plattenhöhe beträgt 320 beziehungsweise 290 mm, das Konstruktionsrastrer ist  $\leq 3,00 \text{ m}$ . Zur Sicherung gegen Rißbil-

dung und gegen Schwinden sind im Abstand von 12,00 m Bewegungsfugen vorgeschrieben und ab 1,67 m Bewehrungsseisen in die Lagerfuge einzulegen. Die Platten werden im Abstand  $\leq 60 \text{ cm}$  mit den Stützen verankert. Für die Herstellung werden weitestgehend die Regeln der Technik für den Mauerwerksbau zugrunde gelegt.

Eine Oberflächenbehandlung, gegen eindringende Feuchte im Einbauzustand und Tauwasserbildung (Feuchtigkeitsgehalt des Holzbetons  $\omega_{\max} \leq 18 \text{ Masse-Prozent}$ ), erfolgt durch beidseitig ausgeführte Putze beziehungsweise einer Wetterhaut aus Asbestzementtafeln.

Neben dem rationalisierten mehrgeschossigen Wohnungsbau wird zur Verbesserung der Wohnbedingungen auch an Entwicklungen für den individuellen Wohnungsbau gearbeitet. Daraus resultiert Anfang der 1970er Jahre die Veröffentlichung von 20 ausgewählten Projektlösungen für "bauinteressierte Bürger". In diesem Zusammenhang werden auch eine Reihe von Projekten für ein- und zweigeschossige Wohnbauten (Einzel-, Doppel-, Reihenhäuser) aus Holzbeton vorgestellt.<sup>64</sup> (Abb. 4.13)

In der Deutschen Demokratischen Republik sind die Untersuchungen und die Experimente mit Holzbeton Teil der bauwirtschaftlichen Anstrengungen die Nutzung einheimischer Sekundärrohstoffe für eine "effektive Materialökonomie" zu intensivieren.<sup>65</sup> Daher werden insbesondere volkswirtschaftliche Aspekte für den verbreiteten Einsatz von Holzbeton im allgemeinen Hochbau reklamiert.<sup>66</sup> Neben der Sekundärstoffverwertung von Holz- und Rindenabfällen, für ein verbessertes Aufforsteten und die Mechanisierung der Forstwirtschaft, wird die Mauerziegelsubstitution mit einem energiesparenden und kosteneffizienten Baustoff herausgestellt, also bei gleichen

Holzbeton Technische Kennwerte	
Rohdichte [ $\text{kg/m}^3$ ] <sup>1</sup>	800
Druckfestigkeit [ $\text{N/mm}^2$ ] <sup>1</sup>	15
Feuchtigkeitsgehalt [Masse-%] <sup>2</sup>	25
Wärmeleitfähigkeit [ $\text{W/mK}$ ] <sup>3</sup>	0,15

Abb. 4.11 Technische Kennwerte (Mittelwerte) von Holzbetonplatten

<sup>1</sup> klimatisiert;

<sup>2</sup> bei Auslieferung bez. auf Trockenmasse;

<sup>3</sup> Meßwert der bei 80 °C getrockneten Proben

(Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 9)

Abb. 4.12 Rechenwerte<sup>67</sup> von Holzbetonplatten (Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 9)

Holzbeton Rechenwerte	
Zul. Kantendruckspannung [ $\text{N/mm}^2$ ]	4
Wärmeleitfähigkeit [ $\text{W/mK}$ ]	0,21
Spezifische Wärmekapazität [ $\text{J/gK}$ ]	1,675
Volumen bezogene Wärmekapazität [ $\text{kWh/m}^3\text{K}$ ]	0,372

Vom Steinholz zum Holzleichtbeton

Holzbeton

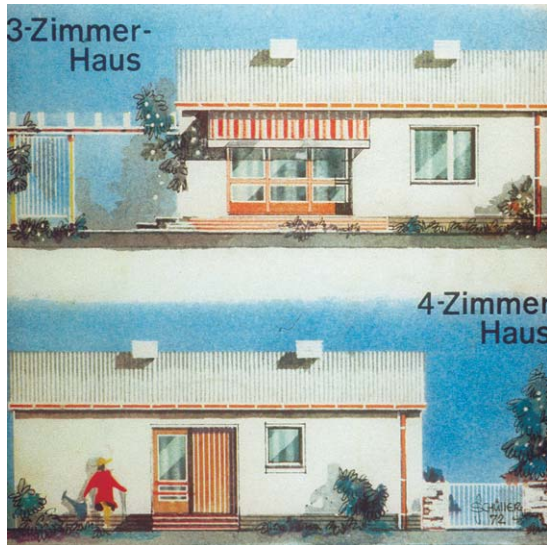


Abb. 4.13 Eingeschossige Holzbeton-Einzelhäuser  
( $\approx$  1972)

Kenngroßen eine “eindeutige ökonomische Überlegenheit des Holzbetons” festgestellt. Allerdings gilt der hohe Zementeinsatz ( $466 \text{ kg/m}^3$ ) als Nachteil.<sup>68</sup>

Aus heutiger Sicht ist bemerkenswert, dass bezüglich der Weiterentwicklung des Baustoffs Holzbeton, das “Handmontage-Element” gegenüber der als aufwendiger eingestuftem Entwicklung von großformatigen Platten-Elementen bevorzugt wird. Für die künftige Verwendung von Holzbeton im Hochbau versprechen gerade “effektive und rationell einsetzbare kleinformatische Bauelemente für die Handmontage” erfolgreiche Einsatzmöglichkeiten.<sup>69</sup>

#### 4.4 Aktuelle Produkte und Systeme

Rückblickend über etwa 150 Jahre wird eine wechselvolle Geschichte der Kombination organischer Zusatz- oder Füllstoffe mit anorganischen Bindemitteln sichtbar. Heute setzt man Steinholz nur mehr in selten Fällen ein, auch wenn in Meyers Großem Taschenlexikon die Verwendung als “gut wärmedämmender Fußboden- und Wandbelag [sic!]” immer noch vermerkt wird.<sup>70</sup>

Dem Holzbeton gilt ebenso keine breite Aufmerksamkeit im Bereich avancierter Baukonstruktion beziehungsweise moderner Materialtechnologie mehr; so finden sich in neueren Publikationen<sup>71</sup> keine Hinweise auf die Materialkombination. Gleichwohl bestehen auch jenseits von Forschungslabors seit Jahren am Markt etablierte Produkte, die die bekannten Vorteile von Holzbeton in zum Teil speziellen, patentierten Verfahren nutzen. So vermerkt Beraus, dass der Holzspanbeton heute “in vielen Ländern dieser Erde produziert und mit Erfolg in vielfältiger Form angewendet wird.”<sup>72</sup> Nachfolgend sei der Blick auf zwei dieser Produktgruppen gerichtet, um einerseits Kontinuität zu belegen, andererseits etwaige Chancen und auch Hemmnisse einer Produkteinführung zu beleuchten.

##### 4.4.1 Holzspanbeton<sup>73</sup>

In den 1920er Jahren erfolgen erste Versuche mit der Kombination von Zement und Holzspänen als organischem Zuschlagsstoff. Die positiven Materialeigenschaften von Steinholz will man nutzen und sucht mit der Wahl eines anderen Bindemittels negative Einflüsse wie das Schwind- und Quellverhalten zu minimieren. Der Niederländer Richard Handl lässt sich 1932 beziehungsweise 1934 ein “Verfahren zur Herstellung poröser Formlinge aus

cellulosehaltigen Stoffen und Zement” patentieren. Darauf aufbauend entwickelt er ein ebenfalls angemeldetes “Verfahren zur Herstellung eines Leichtbaustoffs aus Holzabfällen und Zement”, das eine neue Produktbezeichnung einführt und bis heute die Basis für die Produktion von Holzspanbeton darstellt.

Wie beim Steinholz werden als Füllmaterial für die Herstellung von Holzspanbeton vor allem Nadelhölzer (Fichte, Tanne, aber auch Birke, Esche und Linde) verwendet. Hierbei handelt es sich in der Regel um Rest- und Abfallstoffe aus der Forstwirtschaft und aus Handwerksbetrieben, wie Spreißelholz, Hackgut, Schäl- oder Hobelspäne. Beim Holzspanbetonverfahren wird das organische Material zunächst in Schlagmühlen mechanisch bearbeitet, gereinigt und in entsprechende Korngrößen zerkleinert, und anschließend mit “Mineralisierungs-Additiven” durchtränkt. Dabei werden die Holzspäne vollständig angefüllt, bis sich an der “Oberfläche eine Gelschicht bildet”, an der sich das zugemischte Bindemittel (Portlandzement) gut anlagern kann und einen festen Verbund der Zuschläge gewährleistet. Ferner verhindert die Mineralisierung das Eindringen von Feuchtigkeit. Von der Festigkeitsentwicklung verhält sich der frische Holzspanbeton ähnlich dem “Schwerbeton” und kann wie dieser werkseitig geformt werden.

Neben den aus der Werkstoffkombination bekannten positiven Materialeigenschaften lassen sich mit Holzspanbeton, bei Rohdichten zwischen  $450$  und  $650 \text{ kg/m}^3$ , Festigkeiten bis zu  $20 \text{ N/mm}^2$  erzielen. Die Wärmeleitfähigkeitswerte bewegen sich im Bereich von  $0,11$  und  $0,15 \text{ W/mK}$  und nehmen mit steigender Rohdichte zu. (Abb. 4.14)

Die Eigenfeuchte des Holzspanbetons beträgt etwa  $5$  bis  $11$  Masse-Prozent. Das Material



kennzeichnet ein "makroporiges Gefüge mit nahezu keinen Kapillaren" und unterbindet daher eine saugende Wirkung. Das diffusionsoffene Material weist durch die porige Gefügestruktur ein gutes Sorptionsverhalten (Feuchtigkeitsaufnahme/Feuchtigkeitsabgabe) auf (Wasseraufnahme 0,7 kg/m<sup>2</sup> pro h, Wasserabgabe 2,1 kg/m<sup>2</sup> pro h). Es besteht ein kontinuierlicher Luftfeuchtetransport über die bestehenden Holzbetonstege im Mauerwerk. Somit verfügt der Holzspanbeton sowohl über ein gutes Dampfdiffusionsverhalten als auch über eine hohe Witterungsbeständigkeit im Schutz gegen Frost- und Frostausalzbeanspruchungen. Das Material ist nach ÖNORM als "schwer entflammbar" eingestuft.<sup>74</sup>

Es existiert eine breite Produktpalette,<sup>75</sup> die im allgemeinen Hochbau, vor allem dem Wohnungsbau, Einsatz findet, die aber ebenso im Bereich von Lärmschutzmaßnahmen nennenswerte Potenziale aufweist. Holzspan-Mantelsteine sind in einer Vielzahl von Standard- und Sonderanfertigungen für tragende und nichttragende Innen- und Außenwände erhältlich.<sup>76</sup> Aus dem umfangreichen Steinsortiment (Abb. 4.15) können ebenfalls Fertigwandmodule hergestellt werden. Produkte des patentierten Holzspanbeton-Verfahrens findet man in Österreich vor allem unter Firmennamen wie "Durisol" und "isospan".

Die Steine werden trocken, "satt gestoßen" versetzt und anschließend mit Beton verfüllt. Daher muss eine sorgfältige Ausführung des Mauerwerksverbands gewährleistet sein. Je nach Wandstärke (tragende Wände zwischen 17 und 37,5 cm) und Kernbetonfüllung erreicht ein Mauerwerk aus Holzspan-Mantelsteinen U-Werte bis 0,30 W/m<sup>2</sup>K; ausgeführt mit einem Wärmedämmverbundsystem las-

sen sich Werte bis zu 0,20 W/m<sup>2</sup>K erzielen.<sup>77</sup> Die Lastabtragung erfolgt über die Betonfüllung, die auch einen guten Schallschutz der Wandaufbauten gewährleistet. Die bei leichten porigen Materialien ( $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,15 \text{ W/mK}$ ) geringere Wärmespeicherkapazität wird ebenfalls durch den Kernbeton kompensiert. Dadurch können raumseitig auftretende Temperaturspitzen gepuffert werden. Insgesamt führen die höheren Temperaturen an den Bauteiloberflächen von Holzspanbeton zu einer guten Balance zwischen Raumluft- und Wandoberflächentemperatur und reduzieren somit den Heizwärmebedarf bei gleichzeitig behaglicheren Raumklima.

Darüber hinaus wird der Holzspanbeton als ein- und zweischichtige Dämmplatten, als verlorene Schalung beziehungsweise zur Herstellung von Sonderschalungen verarbeitet. Eine "Neuentwicklung" stellen vorgefertigte Wandelemente aus Holzspan-Mantelsteinen dar. Zum einen können somit großformatige Elemente vorgefertigt werden, was den Fertigungsprozess beschleunigt, zum anderen wird die Qualität der Herstellung erhöht und kann witterungsunabhängig erfolgen.<sup>78</sup>

#### 4.4.2 Holzwolleleichtbauplatte <sup>79</sup>

Ein weiteres Produkt ist die Holzwolle-Leichtbauplatte, die jedoch eine besondere Ausführung darstellt. Hierbei handelt es sich um Leichtbauplatten aus einem "schwach verdichteten Gemisch aus Holzwolle und mineralischen Bindemitteln (Zement oder Magnesit)."

Als Holzwolle bezeichnet man lange ineinander verknäulte und gewellte Holzspäne, in der Regel zwischen 1 und 4 mm breit und etwa 0,03 bis 0,4 mm dick, die als Dämm- und Verpackungsmaterial eingesetzt werden.<sup>80</sup> Das Ausgangsmaterial für die Dämmplatten

Holzspanbeton	
Rohdichte (mit Schwerstoffzuschlägen) [kg/m <sup>3</sup> ]	400 – 600 (> 1000)
(Würfel-)Druckfestigkeit (mit Spezialmischungen) [N/mm <sup>2</sup> ]	9,5 – 20 (bis 34,5)
Biegezugfestigkeit (bei Spezialfabrikaten) [N/mm <sup>2</sup> ]	8,5 – 12 (bis 20)
Wärmeleitfähigkeit [W/mK] ( $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$ – $1000 \text{ kg/m}^3$ )	0,11 – 0,37
Dampfdiffusionswiderstandsfaktor [ $\mu$ ]	4 – 6

Abb. 4.14 Technische Kennwerte von Holzspanbeton (Vgl. Beraus, 2001, S. 105f.)

Abb. 4.15 Holzspanbeton als (gedämmter) Mantelstein und Platte (Fa. isospan)



Vom Steinholz zum Holzleichtbeton

Aktuelle Produkte und Systeme

<b>Holzwole-Leichtbauplatte Heraklit-M (Magnesit)</b>	
Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	400
Druckfestigkeit (bei 10% Stauchung, d = 15–35) [N/mm <sup>2</sup> ]	≥ 0,20
Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	0,4 – 1,7
Wärmeleitfähigkeit [W/mK] (d = 25–100 / d = 15 mm)	0,075 – 0,150
Dampfdiffusionswiderstandsfaktor [μ]	2 – 5
Flächengewicht [kg/m <sup>2</sup> ]	4,5 – 33
Porosität Anteil Luftporen [V-%]	> 65

Abb. 4.16 Technische Kennwerte von Holzwole-Leichtbauplatten. (Vgl. HeinzeBauOffice, 2000, Datenblatt-Nr. 2093/01)

Abb. 4.17 Holzwole-Leichtbauplatten



bildet die Holzwole aus luftgetrockneten heimischen Hölzern<sup>81</sup>. Anschließend wird diese mit Zement (graue Farbe) oder kaustisch gebranntem Magnesit (beige Farbe) gebunden. Daher weisen diese Platten eine geringere Dämmwirkung auf, als Platten ohne Bindemittel.

Holzwoleleichtbauplatten – das heißt Holzwole-Platten (HWL-Platten) sowie Holzwole-Schichtplatten (ML-Platten) – gelten seit Jahrzehnten als eine Art Universal-Dämmstoff am Bau mit guter Diffusionsfähigkeit sowie Schalldämmeigenschaft und werden meist als Putzträgerplatten verwendet.

Ausgehend von einem Regelformat (2000 x 500 mm) werden diese in Bauteildicken von 15 bis 100 mm hergestellt. Die fertigen, sehr stabilen Platten lassen sich leicht bearbeiten, sind selbsttragend sowie wand- und deckenbildend. Aufgrund der relativ niedrigen Dämmwirkung sind im Vergleich zu anderen Dämmstoffen jedoch stärkere Wanddicken erforderlich. „Durch das hohe Wasseraufnahmevermögen können Holzwole-Leichtbauplatten in der Außenverwendung nur mit zusätzlichen Schutzmaßnahmen zum Einsatz kommen.“

Hinsichtlich des Wärmeschutzes können mit konventionellen Wandaufbauten und einer beidseitigen Außenwandbekleidung mit Holzwole-Leichtbauplatten (d = 50 mm) Anforderungen der Niedrigenergiebauweise erfüllt werden. Bei einer Holzständerwand (d = 16 cm, Holzanteil der Konstruktion 20 %) wird ein U-Wert von 0,23 W/m<sup>2</sup>K, bei Mauerwerk (d = 36,5 cm) ein U-Wert von etwa 0,17 W/m<sup>2</sup>K erreicht.

Gegenüber herkömmlichen Dämmmaterialien, wie Polystyrol oder Glaswole, wirkt sich die deutlich höhere Rohdichte insbesondere hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschut-

zes (das heißt bezüglich Wärmespeicherfähigkeit, Temperaturamplitudendämpfung, Phasenverschiebung) positiv aus.<sup>82</sup> Dabei ist stets das Verhalten der Gesamtkonstruktion zu beurteilen.

Aufgrund der spezifischen Eigenschaften (schwer entflammbar) kann mit Holzwole-leichtbauplatten auch die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen erhöht werden.

Da die Platten weitgehend aus natürlichen Rohstoffen hergestellt wird und bei der Herstellung keine Umweltbelastung entsteht, gilt das Produkt als gut recyclebar und ökologisch unbedenklich deponierbar.

## 4.5 Zusammenfassung

Bei der Kombination von organischen Zusatzstoffen und anorganischen Bindemitteln, über die verschiedenen Rezepturen und unterschiedlichen Herstellungsverfahren von Steinholz beziehungsweise Holz(span)beton, lässt sich festhalten, dass stets eine Reihe von Vorteilen herausgestellt werden:

- wärmedämmend und hohe Elastizität
- robust gegen Verschleiß
- gute Sorptionsfähigkeit
- angenehme Oberflächentemperaturen

Als Nachteile gelten das hohe Schwind- und Quellverhalten sowie die Schwierigkeiten einer Stahlarmierung aufgrund der höheren Korrosionsgefahr. Gewiss stellen der technisch apparative Aufwand gerade der Steinholzherstellung, mit großen Drücken und hohen Temperaturen, ein energetisch aufwändiges wie auch kostenintensives Verfahren dar. Seit einigen Jahren beschäftigt man sich aufgrund von Ressourcenverknappung (Sand, Kies) und Gewichtersparnis (Wand- und Deckenkonstruktion) wieder eingehender mit diesen Konzepten die unter derzeitigen technologischen Möglichkeiten fortgeführt werden. Obwohl heutzutage Bauteile auf Holzbetonbasis weitgehend nur als gepresste Zement gebundene Spanplatten beziehungsweise als Holzwolleleichtbauplatten mit nichttragenden, wärmedämmenden Funktionen im Bauwesen verwendet werden, eröffnet die Weiterentwicklung dieser Materialkombination viel versprechende Einsatzmöglichkeiten. Darüber hinaus gewinnt der Holz(span)beton mit seinen natürlichen Stoffen und durch eine "komplette" Recyclingkette<sup>83</sup>, vom Rohmaterial bis zur Baustelle, im Zuge der Neubewertung von Energie- und Stoffströmen eine neue Bedeutung.

## Anmerkungen

- <sup>1</sup> Vgl. Scherer, 1907, S. 98-113; Cordes, 1932, S. 5f.
- <sup>2</sup> Vgl. Cordes, 1932, S. 5f.
- <sup>3</sup> Scherer, 1907, S. 72-74
- <sup>4</sup> Vgl. Scherer, 1907, S. 75-77
- <sup>5</sup> Vgl. Scherer, 1907, S. 74-75
- <sup>6</sup> Vgl. Fasse, 1923, S. 1f.
- <sup>7</sup> Vgl. Ahnert/Krause, 3/1996, S. 179; vgl. Vollenschaar, 25/1998, S. 371
- <sup>8</sup> Vgl. Ahnert/Krause, 3/1996, S. 179
- <sup>9</sup> Vgl. Tabelle in: Vollenschaar, 25/1998, S. 372
- <sup>10</sup> Vgl. Scherer, 1907, S. 98-113
- <sup>11</sup> Vgl. Fasse, 1923, S. 13
- <sup>12</sup> Beizend gebrannter Magnesit
- <sup>13</sup> Cordes, 1932, S. 5f.
- <sup>14</sup> Vgl. Cordes, 1932, S. 5f.
- <sup>15</sup> Robust gegen Stoß- und Druckbeanspruchung, Abnutzung minimal, unempfindlich gegen Öl- und Schmierstoffe, absolute Feuersicherheit, schalldämpfend, Vgl. Fasse, 1923, S. 13f.
- <sup>16</sup> Vgl. Fasse, 1923, S. 21
- <sup>17</sup> Vgl. Scherer, 1907, S. 104
- <sup>18</sup> Vgl. Scherer, 1907, S. 105f.
- <sup>19</sup> Vgl. Fasse, 1923, S. 16
- <sup>20</sup> Vgl. Technische Berichte, 1956
- <sup>21</sup> Vgl. Scherer, 1907, S. 107
- <sup>22</sup> Vgl. Probst, 1951, S. 47-56
- <sup>23</sup> Fasse, 1923, S. 73f.
- <sup>24</sup> Vgl. Scherer, 1907, S. 107f.
- <sup>25</sup> Vgl. Hugo Koch (1903), zit. nach Ahnert/Krause, 3/1996, S. 179; Scherer, 1907, S. 110ff.
- <sup>26</sup> Vgl. Ahnert/Krause, 3/1996, S. 179
- <sup>27</sup> Hersteller war die Fa. Otto Sening & Co in Potschappel bei Dresden. Vgl. Scherer, 1907, S. 110
- <sup>28</sup> Die (Regel-)Formate haben Abmessungen von max. 1670 x 830 mm, 1520 x 838 mm sowie 995 x 995 mm und Bauteildicken von  $\geq 10$  mm. Preislich wird das Material im Bereich von Linoleum gesehen. Vgl. Scherer, 1907, S. 110f.
- <sup>29</sup> Vgl. Scherer, 1907, S. 111
- <sup>30</sup> Vgl. Hummel, 10/1948, S. 201-204
- <sup>31</sup> Vgl. Emperger, I/1919, S. 7f. und IV-V/1919, S. 46-48
- <sup>32</sup> Weitere Experimente, z.B. im Brückenbau in der Sowjetunion in den 1930er Jahren, zeigen, dass sich Holz durchaus als Bewehrungsmaterial bei zugbeanspruchten Bauteilen untergeordneter Art eignet. Allerdings wird in den Diskussionen stets das Problem einer fehlenden Feuersicherheit bzw. Feuerbeständigkeit herausgestellt. Vgl. Charisius, 1947, S. 22ff.
- <sup>33</sup> Vgl. Charisius, 1947, S. 7
- <sup>34</sup> Vgl. Charisius, 1947, S. 8f.
- <sup>35</sup> Charisius weist daraufhin, dass man bei der Schädlichkeit von Wasser zwischen den Auswirkungen auf den Mischvorgang und denen auf den fertigen, abgebundenen, erhärteten Beton unterscheiden müsse. Vgl. Charisius, 1947, S. 9, 20

- <sup>36</sup> Nach Charisius soll der Kornanteil  $< 0,2$  mm nicht höher als 5 % des Gesamtgewichts der Mischung betragen. Vgl. Charisius, 1947, S. 9f.
- <sup>37</sup> Kalkmilch, Zementleim, Alkaliwasserglas, Magnesiumsilikofluorid (Magnesiumfluat), Kalziumchlorid, wässrige kolloidale Aufschlämmungen. Vgl. Charisius, 1947, S. 9ff.
- <sup>38</sup> Vgl. Hummel, 10/1948, S. 201
- <sup>39</sup> Als gängige Verfahren gelten:
  - Eintauchen in kalter oder heißer Weißkalkmilch (etwa 12 bis 24 Stunden) (ältestes Verfahren)
  - Eintauchen in Zementmilch (etwa 6 Stunden)
  - Eintauchen in Lösungen von Wasserglas oder Chlorkalzium, essigsaurer Tonerde, Schmierseife
  - Eintauchen in Tonbrühe (1 Teil Ton und 2 Teile Wasser)
  - Tränken mit Fluaten
  - Imprägnieren mit Asphalt- oder Bitumenemulsionen (sei nach Hummel umstritten, da das "gefährdete Faulen des Sägemehls nirgends einwandfrei festgestellt" werden konnte), Karbolium (letzteres wegen Geruchsbildung kaum eingesetzt)Vgl. Hummel, 7-9/1944, S. 248; 10/1948, S. 202
- <sup>40</sup> Vgl. Charisius, 1947, S. 9ff.
- <sup>41</sup> Druckfestigkeit 250 kg/cm<sup>2</sup>. Vgl. Hummel, 12/1959, S. 267
- <sup>42</sup> Charisius bilanziert, dass die Entwicklung des Holzbetons noch am Anfang stehe und das systematische Untersuchungen zu den Eigenschaften, der stofflichen Zusammensetzung und zur Herstellung fehlen. Vgl. Charisius, 1947, S. 6
- <sup>43</sup> Vgl. Charisius, 1947, S. 11f., 20
- <sup>44</sup> Vgl. Charisius, 1947, S. 12
- <sup>45</sup> Druckfestigkeiten 70 bzw. 250 kg/cm<sup>2</sup>; E-Moduli 22.100 bzw. 26.200 kg/cm<sup>2</sup>; vgl. Charisius, 1947, S. 12ff. E-Modul 30.000 kg/cm<sup>2</sup>; vgl. Hummel, 10/1948, S. 204
- <sup>46</sup> Vgl. Charisius, 1947, S. 3, 18
- <sup>47</sup> Vgl. Charisius, 1947, S. 21f. Charisius erwähnt in diesem Zusammenhang auch eingeschränkte Möglichkeiten für "Holzbetonfundamente". Vgl. Charisius, 1947, S. 18f.
- <sup>48</sup> Wärmeleitfähigkeitswerte 0,132 bis 0,581 kcal/mh°C. Vgl. Charisius, 1947, S. 15
- <sup>49</sup> Vgl. Charisius, 1947, S. 14-17
- <sup>50</sup> Plattenabmessungen 180 x 100 cm, d = 3,5 cm. Vgl. Charisius, 1947, S. 17f., 20f.
- <sup>51</sup> Vgl. Charisius, 1947, S. 20f.
- <sup>52</sup> Vgl. Charisius, 1947, S. 3
- <sup>53</sup> Bursian/Pinternagel, 1973, S. 6
- <sup>54</sup> Beim Deutschen Amt für Messwesen und Warenprüfung, Dresden. Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 27ff.
- <sup>55</sup> Bursian/Pinternagel, 1973, S. 6
- <sup>56</sup> Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 21
- <sup>57</sup> Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 6f.
- <sup>58</sup> Die Abmessungen der industriell gefertigten Holzbetonplatten betragen: 740 x 320 x 120 mm, 740 x 290 x 120 mm, 740 x 320 x 70 mm, 490 x 290 x 120 mm.

Vom Steinholz zum Holzleichtbeton

Zusammenfassung

Vom Steinholz zum  
Holzleichtbeton

Zusammenfassung

- Nach Bedarf konnten noch Teilgrößen hergestellt werden. Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 7ff.
- <sup>59</sup> Druckfestigkeitswerte zwischen 12 kp/cm<sup>2</sup> (Einzelwert) und 15 kp/cm<sup>2</sup> (Mittelwert). Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 9
- <sup>60</sup> Schrauben 6 x 60, Einbindelänge 40 mm, und Nägel 38/100, Einbindelänge 85 mm. Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 9 und 21f.
- <sup>61</sup> Hier gilt das Fenster als Schwachstelle. Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 10f.
- <sup>62</sup> Einfamilienhäuser, eingeschossige Schul- und Verwaltungsbauten, Bungalow und Erholungsgebäude. Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 10 und 16ff.
- <sup>63</sup> Vgl. Holzbeton im Landwirtschaftsbau, 1971
- <sup>64</sup> Vgl. Einzelhäuser, 1972, S. 3
- <sup>65</sup> Vgl. Holzbeton im Landwirtschaftsbau, 1971, S. 1
- <sup>66</sup> Wie auch die Projektarbeit unter anderem der "Entfaltung der sozialistischen Gemeinschaftsarbeit zur effektiven Nutzung der materiellen und finanziellen Fonds, der Erreichung des wissenschaftlich-technischen Höchststandes auf den Gebieten Forschung und Entwicklung, Projektierung und Produktion, Einsatz und Verwendung sowie der Erzeugnisprognose" diene. Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 8
- <sup>67</sup> - Zulässige Kantendruckspannung 4 [kp/cm<sup>2</sup>]  
- Wärmeleitfähigkeit 0,182 [kcal/hm<sup>2</sup>grd]  
- Spezifische Wärme 0,40 [kcal/kg<sup>2</sup>grd]  
- Wärmespeicherwert 3,89 [kcal/hm<sup>2</sup>grd]  
Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 9
- <sup>68</sup> Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 15f.
- <sup>69</sup> Bei der Nutzung von Reserven für die Schaffung zusätzlicher Wohnraums, im individuellen Wohnungsbau mit hohem Eigenleistungsanteil, bei Um- und Ausbauten von Wohnungen, Anbauten sowie Ergänzungs- und Erweiterungsbauten besonders im ländlichen Bauen, Erholungsbauten und Garagen. Vgl. Bursian/Pinternagel, 1973, S. 22
- <sup>70</sup> Meyers Großes Taschenlexikon, Bd. 21, 2/1987; S. 92
- <sup>71</sup> Vgl. Watts, 2001
- <sup>72</sup> Beraus, 2001, S. 103
- <sup>73</sup> Vgl. Beraus, 2001, S. 103
- <sup>74</sup> Vgl. Beraus, 2001, S. 105f.
- <sup>75</sup> Hergestellt werden unter anderem Mantelsteine, Dämm- und Mantelbetonplatten, Außenwandelemente, Hourdis- und Kassettenhourdisdecken, Dachelemente, Schallschutzelemente, Bodenplatten. Vgl. Beraus, 2001, S. 106ff.
- <sup>76</sup> d = 15–35 cm, h = 25cm, l = 50, 100, 105, 125 cm, auch mit intergrierter Wärmedämmung.  
Vgl. <<http://www.durisol.at>>; <<http://www.isospanl.at>>
- <sup>77</sup> Vgl. Produktunterlagen "Steinprogramm - Übersicht" der Fa. Durisol-Werke GesmbH, Achau (03/2003)
- <sup>78</sup> Durisol-Wandelemente werden bei einem Flächengewicht zwischen 70 und 150 kg/m<sup>2</sup> bis zu Abmessungen von 6,00 x 3,20 m hergestellt. Vgl. Produktunterlagen "Steinprogramm - Übersicht" der Fa. Durisol-Werke GesmbH, Achau (03/2003)
- <sup>79</sup> Vgl. <<http://www.leichtbauplatten.de/produkte>> (08.03.2003)

- <sup>80</sup> Vgl. Meyers Großes Taschenlexikon, Bd. 10, 2/1987, S. 61
- <sup>81</sup> Für ähnliche Platten sind auch Versuche mit Kartoffelkraut durchgeführt worden. Vgl. Hummel, 10/1948, S. 202
- <sup>82</sup> Vgl. Produktinformationen Heraklith Systembauweise. Simbach/Inn: Deutsche Heraklith GmbH, 12/2000, S. 18-31
- <sup>83</sup> Vgl. Beraus, 2001, S. 104f.

## 5 Holzleichtbeton als Material für thermisch passive Bauteile

### 5.1 Untersuchungssystematik

Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Arbeiten sind in den gewählten Betrachtungsebenen (Abb. 2.1+2.8) jeweils anhand derselben Untersuchungssystematik durchgeführt worden. Dabei gilt es für das Kompositmaterial wichtige Parameter im Bereich definierter "Zielgrößen" zu erlangen. Dies schließt, da es sich um sichtbare Einsatzmöglichkeiten im Bereich von Gebäudefassaden beziehungsweise in Innenräumen handelt, stets über baukonstruktive (Kapitel 5.2, 7.5, 7.7.1 bis 7.7.3) und bauphysikalische Eigenschaften (Kapitel 5.3, 6.4, 7.6, 7.7.4 und 7.7.5) hinaus auch die Beurteilung gestalterischer Aspekte (Kapitel 7.3.6, 7.9.1, 8.2) mit ein. Die Versuchsergebnisse zum mechanischen und thermischen Verhalten bilden die Grundlage für die Durchführung von Potenzialabschätzungen (Kapitel 5.4, 6.5, 7.8). Untersuchungen zu ökologischen Gesichtspunkten, das heißt Fragen zu Stoff- und Energieströmen bei Herstellung und Verarbeitung, Anforderungen an Recyclebarkeit etc., werden nicht vorgenommen. (Abb. 5.1)

Über die grundlegenden Eigenschaften der Ausgangsstoffe hinaus sind anschließend wesentliche Einflüsse von Holz und Zement auf Holzleichtbeton vorab behandelt. Wie bereits im Kapitel 4.3.1 thematisiert, sind hinsichtlich der verfügbaren Wasserarten als Zugabewasser keine nachteiligen Effekte auf (Holzleicht-)Betonmischungen bekannt. Latentwärmespeichermaterialien und Betonzusatzmittel und -stoffe werden im Zusammenhang der jeweiligen Untersuchungen erörtert.

Holz unterscheidet sich stark in den Eigenschaften von anorganischen Zuschlagsstoff-

fen. Daher weist Holzleichtbeton gegenüber anderen Leichtbetonen eine veränderte Charakteristik auf. Die Hohlräume, die das Material prägen resultieren aus der porigen Struktur des organischen Zuschlagstoffs. Die verwendeten Holzarten beeinflussen ebenfalls die (Festigkeits-)Eigenschaften. Für Süddeutschland sind dies in erster Linie Fichte, Kiefer und Tanne.

Charakteristisch für Holzleichtbeton ist zunächst ein höherer Einsatz hydraulischer Bindemittel.<sup>1</sup> Untersuchungen verschiedener Zementarten und deren Einfluss auf Festigkeit und Dimensionsstabilität zeigen, dass die Festigkeitseigenschaften von Standardzementen nur in einem sehr geringen Maße die von Holzleichtbeton beeinflussen. Daraus resultiert, dass für ein kostengünstiges Massenprodukt preiswerte Standardzemente<sup>2</sup> verwendet werden können.

Anforderungen an den Zement sind "gute und verlängerte Verarbeitbarkeit, hohes Wasserrückhaltevermögen [...], hohe Kohäsion, geringe Entmischungstendenzen".<sup>3</sup> Dabei wirkt sich ein größerer Kalkanteil neben der besseren Verarbeitung sowohl auf die Mischung des Komposits als auch auf die Dauerhaftigkeit des gebundenen Holzes positiv aus.

Der Zementanteil im Holzleichtbeton ermöglicht durch die Mineralisierung des Holzes gute Witterungsbeständigkeit und Brandschutzigenschaften sowie einen wirksamen Schutz gegen Pilz- und Insektenbefall.<sup>4</sup> Ebenso wird durch den Zementgehalt die Wasserdichtheit, Abriebfestigkeit und Anstrichdauerhaftigkeit beeinflusst.

Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, kann im Rahmen dieser Arbeit auf eine Reihe wichtiger vorangegangener Untersuchungen aufgebaut werden. Dies betrifft vor allem baukonstruktive Materialeigenschaften und in Teilen

Holzleichtbeton passives Bauteil

Untersuchungssystematik

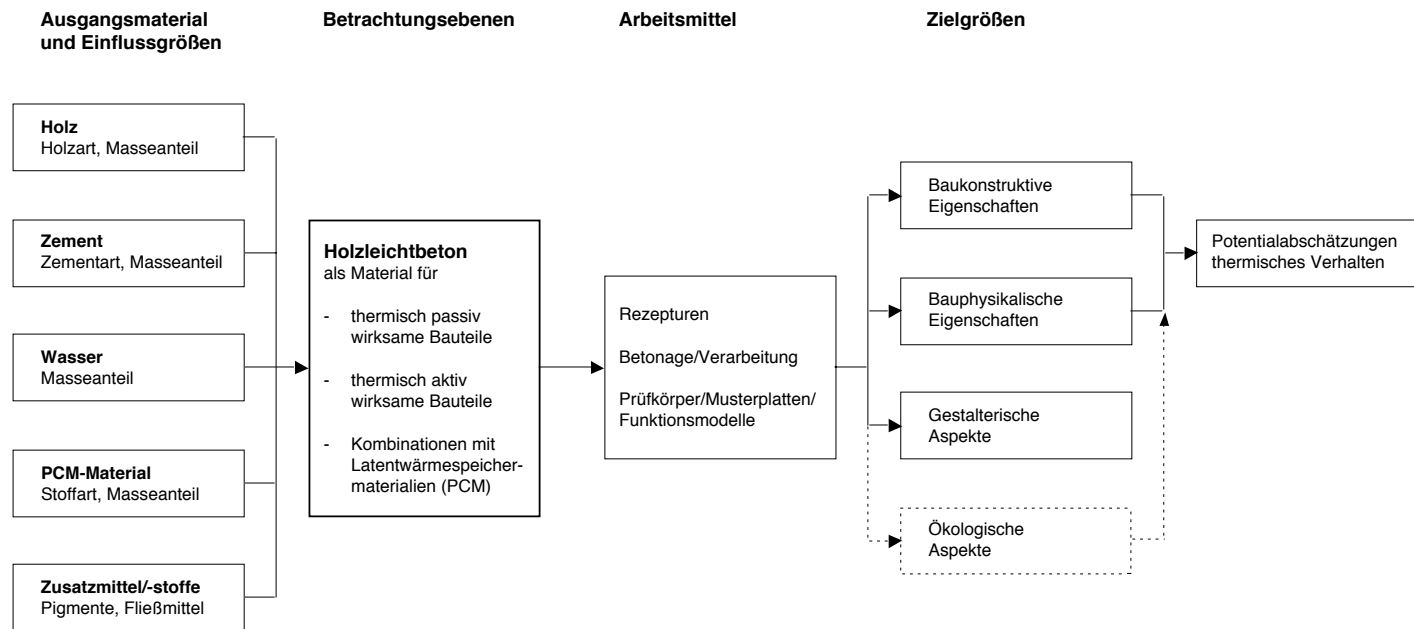


Abb. 5.1 Untersuchungssystematik: Einflussgrößen ("Ausgangsmaterialien"), Betrachtungsebenen und eingesetzte Arbeitsmittel, sowie Zielgrößen ("Untersuchungsbereiche")

auch bauphysikalische Einschätzungen zum Holzleichtbeton als Material für thermisch passive Bauteile. Daher basiert ein Großteil der vorliegenden Kenndaten, auf den umfangreichen Untersuchungen, die an der EPF Lausanne/l-Bois durchgeführt wurden. Soweit diese für die nachfolgenden Arbeiten erforderliche Basisinformationen beziehungsweise wichtige Parameter zum Vergleich darstellen sind diese noch einmal zusammengefasst worden.

Die darüber hinaus gehenden ergänzenden Untersuchungen umfassen Materialprüfungen anhand ausgewählter Mischungen zur Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität, einerseits als Erweiterung der Kennda-

tenlage, andererseits als Basis für die Durchführung einer Potenzialabschätzung. Diese soll anhand verschiedener Außenwandaufbauten erste Einschätzungen zu dem erwartenden Einfluss von Holzleichtbetonbauweisen auf das thermische Verhalten sowie den Heizwärmebedarf von Gebäuden liefern.

## 5.2 Baukonstruktive Eigenschaften<sup>5</sup>

### 5.2.1 Restholzsoriment

Für die Bestimmung der Materialeigenschaften von Holzleichtbeton stellt die möglichst genaue Kenntnis des Restholzsoriments, Hobel- und Sägespäne sowie Sägemehl, eine wichtige Voraussetzung dar.

Detaillierte Untersuchungen zu den wesentlichen Parametern (Fraktionseigenschaften, Holzfeuchte sowie Roh- und Schüttdichte) erfolgten an der EPF Lausanne/I-Bois. Zur Definition der Qualitäten und Quantitäten des Zuschlagstoffs wurde zunächst anhand von Versuchsreihen mit Trockensiebung eine Sieblinie erstellt.<sup>6</sup> (Abb. 5.2) Das verwendete Restholzsoriment bestand aus einem Nadelholzgemisch (Kiefer, Fichte, etwas Tanne), das einen repräsentativen Querschnitt typischer "Restposten" der Holzverarbeitenden Industrie abbildet.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass bis zu einer Größe von  $\varnothing$  6,3 mm die Holzteilchen in ihrer rund gekräuselten Form 'klassischen' Leichtbetonzuschlägen gleichen. Ferner wurde deutlich, dass Fraktionen  $> \varnothing$  6,3 mm einerseits einen geringen Masseanteil aufweisen, (Abb. 5.3) andererseits diese 'Grobzuschläge' auch große Fehlerbereiche im Gefüge verursachen, die wiederum die statischen Eigenschaften, wie Druckfestigkeit, E-Modul etc. negativ beeinflussen können. Daher sollten diese grundsätzlich ausgesiebt werden. Dagegen stellt die Verwendung von Spänen mit einer Länge bis zu 5 cm zumindest kein materialtechnisches Problem dar. Nach weiterführenden Untersuchungen wurden aus den verschiedenen Schütffraktionen die Darrschütt- sowie die Rohdichte ermittelt. Ziel der Analysen war eine möglichst exakte Bestimmung von Werten für die Stoffraumbere-

chnung. In den Baustofftabellen sind gerundete Zahlenbereiche angeben, die meist kleinteilige und feine Holzmischungen nicht ausreichend berücksichtigen.

Während die (Darr-)Schüttdichte durch volumenbezogenes Wiegen ermittelt werden konnte, erfolgte die Bestimmung der Rohdichte über angefertigte Probemischungen und anschließende "Stoffraumrückrechnungen". Auftretende Unterschiede resultierten aus dem Verhältnis von Spangröße und Anzahl eingeschlossener Luftporen im Stoffverbund. (Abb. 5.4)

Für die Aufstellung möglichst genauer Mischungsverhältnisse stellt die Kenntnis der Holzfeuchte im Restholzsoriment eine entscheidende Einflussgröße dar.

Die Holzfeuchte setzt sich aus Oberflächenfeuchte und Kernfeuchte zusammen. Kernfeuchte bezeichnet den Wasseranteil, der durch kapillares Saugen vom Holzpartikel aufgenommen wird und zum (Auf-)Quellen führt. Unter Oberflächenfeuchte versteht man in erster Linie den Anteil an Wasser, der sich als dünner Film auf der Holzoberfläche bildet. Diese kann aber auch im Kontaktbereich einzelner Holzteilchen oder, bei sehr nassem Gemisch, in Partikel-Hohlräumen auftreten.

Das an der EPF Lausanne/I-Bois untersuchte Holzgemisch wies Werte zwischen 23,5 und 27,0 % Wassermasse-Anteil auf. Den aufgestellten Stoffraumberechnungen wurde von Gliniorz/Natterer ein Mittelwert von 25 % zugrunde gelegt. Um das Zugabewasser später besser berechnen zu können, insbesondere im Zusammenhang mit einer industriellen Fertigung, wird die Trocknung auf Darrgewicht vorgeschlagen.<sup>7</sup>

Bei der 'klassischen' Betonherstellung sind die Korngrößenverteilung sowie die Oberflä-



Abb. 5.2 Manuelles Sieben des Restholzsoriments (EPF Lausanne/I-Bois)

chenbeschaffenheit und Kornform der Zuschlagsstoffe maßgebende Parameter für die Ermittlung des Wasserbedarfs. Ferner muss der Zuschlagsaufbau, bestimmt durch das Mengenverhältnis der einzelnen Fraktionen, ein hohlraumarmes Gemisch und eine optimale Verdichtung gewährleisten.

Das organische Material stellt im Zementgefüge zunächst einen 'Störfaktor' dar, das heißt bei Zunahme der Fraktionsgröße ist eine Verringerung der Festigkeitsentwicklung zu erwarten. Darüber hinaus kann die Verwendung sehr inhomogener Holzgemischungen durch die unterschiedliche Gesamtoberfläche der Holzteilchen zu Abweichungen beim Wasserbedarf führen.

Diese beiden Effekte konnten in Vorversuchsreihen an der EPF Lausanne/I-Bois mit gleichem Zementanteil und Wasser/Zement-Wert (W/Z-Wert), sehr ähnlichem Porenanteil und

Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Baukonstruktive  
Eigenschaften

Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Baukonstruktive  
Eigenschaften

Genutztes Sieb	Holz-Masse	Darrschüttdichte	Rohdichte
	Mix Fichte, Kiefer, Tanne		Mix Fichte, Kiefer, Tanne
	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
< 1 mm	18	226,89	758
1 – 2,5 mm	46	195,94	750
2,5 – 4 mm	16	170,14	722
4 – ø 6,3 mm	4	107,55	695
ø 6,3 – ø 8 mm	3	73,63	676
ø 8 – ø 10 mm	2	51,73	652
> ø 10 mm	11	35,81	621

Abb. 5.3 Fraktionsmassenverteilung aller Probe-säcke (Gliniorz/Natterer, 2000, S. 26)

unterschiedlicher Fraktionsverteilung, bestä-tigt werden.

### 5.2.2 Zementgehalt

Der Zement ist im Holzleichtbeton der Stoff mit der höchsten Rohdichte und Druckfestigkeit. Daher ist eine Abhängigkeit der Festigkeitswerte vom Zementgehalt zu erwarten, das heißt mit zunehmenden Zementgehalt erhöhen sich die Festigkeitswerte. Gegenüber dieser Hauptkomponente wird der Einfluss des Wasser- und damit auch des Holzanteils insgesamt als nachgeordnet betrachtet. Für den Aufbau und die Eigenschaften des Zementsteins ist vor allem der W/Z-Wert maßgebend. Dieser bestimmt auch die Porosität und damit die Festigkeitseigenschaften des Festbetons.

Bei der vollständigen und ordnungsgemäßen Hydratation eines Zements werden 40 % des Zementgewichts an Wasser chemisch oder physikalisch gebunden. Dies entspricht einem W/Z-Wert von 0,40<sup>8</sup>; in der Betonpraxis liegen

Abb. 5.4 Darrschütt- und Rohdichten (Gliniorz/Natterer, 2000, S. 26)

die W/Z-Werte zwischen 0,42 und 0,75. Der Sachverhalt, dass ein hoher Wasser-Zement-Wert die Eigenschaften des Betons verschlechtert, trifft ebenfalls beim Holzleichtbeton zu. Bei niedrigem W/Z-Wert nimmt die Porosität überproportional ab; ein porenarmer Zementstein weist hohe Festigkeiten auf, hat somit eine größere Dichtigkeit und ist widerstandsfähiger gegenüber mechanischer und chemischer Beanspruchung.<sup>9</sup>

Während für die baukonstruktiven Untersuchungen an der EPF Lausanne/I-Bois mit einem W/Z-Wert zwischen 0,45 und 0,70 (einschl. Holzfeuchte) gearbeitet wurde, könnte dieser im Bereich der Fertigteilherstellung bis auf 0,25 abgesenkt werden, zum Beispiel wie beim Halbtrocknungsverfahren zur Herstellung Zement gebundener Spanplatten. Bei weiteren Untersuchungen zur Beurteilung von "Zusammensetzungsgrenzen" von Holzleichtbeton zeigte sich, dass die Festigkeiten mit abnehmenden Zementgehalt (700 bis

200 kg/m<sup>3</sup>) und überdurchschnittlich zunehmenden W/Z-Wert (0,70 bis 2,80) stetig abnehmen und letztlich gegen null tendieren.

### 5.2.3 Herstellung von Holzleichtbeton

In anorganisch gebundenen Holzwerkstoffen stellt das hydraulische Bindemittel auf die Masse bezogen in der Regel die Hauptkomponente dar. Daher ist es zweckmäßig neben dem Volumen auch die Massenanteile zu berücksichtigen. Dies ermöglicht eine leichter handhabbare Dosierung und Eigenschaftsvoranalyse.

Untersuchungsergebnisse an der EPF Lausanne/I-Bois zeigten, dass eine Mischfolge

- Restholzsortiment
- 3/4 Wasserzugabe (innerhalb von 30 Sekunden), etwa 1 Minute Mischzeit, anschließende Zugabe des
- Zements und des restlichen Wassers innerhalb von 3 Minuten

Vorteile aufweist, da so Entmischungen vermieden werden können. Die Mischzeit betrug anschließend je nach Zusammensetzung zwischen 2 und 4 Minuten.

Im Rahmen dieser Arbeiten wurden zwischen einzelnen Mischaggregaten keine nennenswerten Unterschiede festgestellt.<sup>10</sup>

Insgesamt wurden von Gliniorz/Natterer gute Verarbeitungseigenschaften anhand der durchgeführten Mischungen bilanziert. Probleme traten nur bei niedrigem Wasser-Zement-Wert (< 0,40) und/oder deutlich reduziertem Zementanteil (< 200 kg/m<sup>3</sup>) und entsprechend größerem Holzanteil auf. Bei solch 'extremen' Mischungsverhältnissen scheint die Bindemittelmenge nicht mehr auszureichen, um an den Spänen zu haften beziehungsweise diese vollständig zu umschließen. Mit steigendem W/Z-Wert wurde der Beton flüssiger und ließ sich somit besser verarbei-



ten. Allerdings zeigten die Untersuchungen überraschenderweise, dass mit feinerer Siebfraction auch der notwendige Wasserbedarf für das entsprechende Verarbeitungsmaß geringer ausfällt.<sup>11</sup>

Da das bei den Versuchsreihen an der EPF Lausanne/I-Bois verwendete Restholzsoriment keine Gleichförmigkeit aufwies, das heißt die Spanlängen größere als der Durchmesser und die Späne eher kantig geformt waren, wurden zunächst eine ungleichförmige Verteilung und Entmischungstendenzen erwartet, was sich jedoch nicht bestätigte. Im Gegenteil, es konnte jeweils ein homogenes Gefüge mit gleichmäßig verteiltem Holzanteil festgestellt werden.<sup>12</sup>

Der Porenanteil in den Probekörpern fiel je nach Frischbetonkonsistenz sehr unterschiedlich aus und variierte zwischen 4 und 19 %. Dieser höhere Anteil an Poren beim Holzleichtbeton resultiert wohl aus einem Wasserüberschuss, der nicht bei der Hydratation benötigt wird und sukzessive aus dem Bauteil verdunstet. Die dabei entstehenden Poren stellen eine Art von Verdunstungskanälen dar, die die statischen Eigenschaften schmälern, aber gleichzeitig den Wärmedurchgangswiderstand und die Frost- und Tauwasserresistenz erhöhen.

Für künftige Stoffraumrechnungen wird von Gliniorz/Natterer die Berücksichtigung eines Porenanteils von 8 bis 14 % vorgeschlagen, ein Wert der sich indes durch industrielle Fertigungsverfahren, Einsatz von Pressen etc., noch wesentlich senken lassen könnte.

Obwohl Holzleichtbeton durch den Holzanteil beachtliche Mengen an Feuchtigkeit aufnehmen vermag, muss dies nicht, wie die Versuche an der EPF Lausanne/I-Bois zeigten, beim Komposit zu erheblichen Quellerscheinungen führen. So konnten trotz maß-

licher Ungenauigkeiten bezüglich der verwendeten Formen sehr gleichmäßige Schwindbewegungen festgestellt werden: in allen Richtungen der Probekörper betrug die Schwankungsbreite etwa 1 bis 2 % gegenüber der Ausgangsform.<sup>13</sup>

Es wird angenommen, dass maßliche Änderungen eng mit dem Holz/Zement-Verhältnis korrelieren, also mit dem Holzanteil im Material verknüpft sind.

Zur Minderung des Quelldrucks der Späne, wird beim Einsatz von Holzarten mit höherem Volumenquellmaß (Laubhölzer) eine geringere Spangröße beziehungsweise ein höherer Bindemittleinsatz als zweckmäßig erachtet. Insgesamt ist zwar zu erwarten, dass die größeren Quell- und Schwindbewegungen des Holzes sich auch auf den Materialverbund auswirken. Dies könnte jedoch in Teilen durch den relativ hohen Zementgehalt kompensiert werden.<sup>14</sup>

Daher sind für den Einsatz von Holzleichtbeton insbesondere im Innenausbau nur geringfügige feuchtebedingte Maßänderungen zu erwarten. Allerdings muss, bedingt durch den hohen Zementgehalt, gegenüber dem Beton mit einem höheren Anfangsschwinden gerechnet werden.<sup>15</sup>

#### 5.2.4 Festigkeitseigenschaften

Festigkeit bezeichnet die auf eine Flächeneinheit bezogene Widerstandskraft, die feste Stoffe einer Grenzverformung oder dem Bruch durch Trennung entgegensetzen. Entsprechend wird unter Druckfestigkeit beim Beton die vom Material aufgebrauchte Druckbeanspruchbarkeit verstanden.

Das Tragverhalten von Holzleichtbeton bestimmt vor allem seine Gefügestruktur. Die beiden Hauptkomponenten Zementstein und Holz weisen unterschiedliche Festigkeits- und Verformungseigenschaften auf. Das führt im



Abb. 5.5 Druckfestigkeitsversuch an einem Holzleichtbeton-Prüfkörper (EPF Lausanne/I-Bois)

Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Baukonstruktive  
Eigenschaften

stofflichen Aufbau zu ungleichmäßigen Spannungsverteilungen und -konzentrationen sowie zu örtlichen Rissbildungen.

Da die äußeren Druckkräfte maßgeblich von dem Zementstein aufgenommen werden, ist beim Holzleichtbeton die Druckfestigkeit von der Festigkeit des Zementsteins abhängig.

Die detaillierten Festigkeitsuntersuchungen an der EPF Lausanne/I-Bois erfolgten anhand von Variationen der Haupteinflussgrößen: W/Z-Wert und Zementanteil. In den Untersuchungen wurde eindeutig die Tendenz belegt, dass sich mit zunehmenden Zementanteil die Druck- und Biegezugfestigkeiten erhöhen. Allerdings ist zu beachten, dass ab einem Zementanteil > 1000 kg/m<sup>3</sup> die Materialeigenschaften zunehmend reinen Zementstein glei-

Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Baukonstruktive  
Eigenschaften

	Holzleichtbeton			
Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	700	850	1300	1450
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	300	450	800	1000
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	525	490	520	600
Holzgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	280	200	70	50
Zuschlag (feine Körnung)	Nadelholz	Nadelholz	Nadelholz	Nadelholz
Vorbehandlung	keine	keine	keine	keine
Additive/Zusatzstoffe	keine	keine	keine	keine
W/Z-Wert	1,75	1,09	0,65	0,60
Konsistenz	KP–KF	KP–KF	KP–KF	KP–KF
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	1300	1800	5000	6500
Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	1,50	4,20	13,00	15,00
Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	0,60	1,50	4,50	5,20
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0,10*	0,21	0,55	0,65
Kriechzahl nach DIN 1048, t = 28 [%]**	11,21*	5,82	3,53	2,80*
Schwindmaß nach DIN 1048, t = 28 [%]**	5,20*	2,80	1,29	1,08*

Abb. 5.6 Übersicht von materialspezifischen Kenndaten von Holzleichtbeton  
(Vgl. Fax IEZ Natterer GmbH, 28.11.2000)

\* nicht gemessen; \*\* t = ∞, ca. 1,2 · t = 28

chen und von Holz als Zuschlagsstoff kaum mehr gesprochen werden kann. Die von Gliniorz/Natterer nach 28 Tagen ermittelte Druckfestigkeit von Holzleichtbeton bewegt sich bei einem Zementgehalt von 600 bis 750 kg/m<sup>3</sup> – und leicht parabelförmigen Kurven – im Bereich von 6 bis 14 N/mm<sup>2</sup>; die Biegefestigkeit variiert zwischen 2,50 und 4,20 N/mm<sup>2</sup>. Die Festigkeiten steigen mit zunehmenden W/Z-Wert und erreichen bei 0,55 bis 0,57 ein Maximum; nach 0,65 fallen diese zum Teil wieder deutlich ab. Untersuchungen

zum Verhältnis von Druck- beziehungsweise Biegezugfestigkeit und W/Z-Wert zeigten, dass insgesamt für die Herstellung Zement gebundener Bauteile der Bereich zwischen 0,55 und 0,65 als besonders günstig bezeichnet werden kann. Der E-Modul ist auch abhängig vom Zementgehalt. Mit zunehmendem Zementanteil sinkt dieser tendenziell bei sonst gleichen Stoffraumbedingungen, steigt mit zunehmendem W/Z-Wert und erreicht ein Maximum bei 0,64. Als Zuschlagsstoff mindert Holz die statischen

Qualitäten des Betons. Je größer dessen Anteil ausfällt, desto stärker nehmen die Festigkeitseigenschaften ab. Um zu baupraktischen Festigkeitswerten zu gelangen, muss beim Holzleichtbeton ein höherer Zementgehalt als im 'klassischen' Betonbau den Mischungen zugrunde gelegt werden. Daraus resultiert indes der Nebeneffekt, das der höhere Zementanteil etwaige Inhomogenitäten in der Sieblinie ausgleicht.

Die Eigenschaften des organischen Zuschlagstoffes bestimmen in einem erheblichen Maß den E-Modul. Dieser nimmt bei fallender Kornrohddichte ab, was auch zu einer niedrigeren Betonrohddichte führt. Dagegen begünstigt ein hoher Feinanteil (≤ 2,50 mm) die Festigkeitseigenschaften.

Die Rohddichte des Holzleichtbetons wird stark vom W/Z-Wert beeinflusst. Die höchsten Werte, etwa 1590 bis 1640 kg/m<sup>3</sup>, wurden an der EPF Lausanne/I-Bois im Bereich zwischen 0,55 und 0,65 (mit einem Höchstwert bei 0,63) erzielt.<sup>16</sup> Bei Zementgehalten zwischen 800 und 100 kg/m<sup>3</sup> variierte der Rohddichtebereich zwischen 1300 und 1500 kg/m<sup>3</sup>.

Dies bestätigen weitgehend die Messungen beim ZAE Bayern.<sup>17</sup> Bei Zementgehalten von 600 bis 800 kg/m<sup>3</sup> werden Rohdichten zwischen 1250 und 1700 kg/m<sup>3</sup> ermittelt.

In "regressionsanalytischen" Berechnungen zur Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von den Mischungsparametern konnten Gliniorz/Natterer gute Übereinstimmungen mit den experimentellen Ergebnissen festgestellt werden. Die Druck- und Biegezugfestigkeiten sind (im untersuchten Spektrum) linear abhängig von der Rohddichte. Auffällig ist, dass bei den berechneten Festigkeitswerten der Einfluss des W/Z-Wertes deutlich geringer ausfällt.<sup>18</sup>

### 5.3 Bauphysikalische Eigenschaften

Für eine Potenzialabschätzung zu den Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton im allgemeinen Hochbau ist die Untersuchung einer Reihe grundlegender bauphysikalischer Eigenschaften erforderlich.

An der EPF Lausanne / I-Bois wurden im Rahmen der vorgenannten Versuchsarbeiten auch bauphysikalische Kenngrößen ermittelt. Daran anknüpfend erfolgen ergänzende und partiell erstmalige Untersuchungen zu: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität am ZAE Bayern, Abt. 2: Wärmedämmung und Wärmetransport, in Würzburg. Abschließend werden exemplarisch Untersuchungsergebnisse der EPF Lausanne /I-Bois zum Feuchte-, Schall- und Brandschutz dargestellt.

#### 5.3.1 Ausgangsrezepturen<sup>19</sup>

Für die experimentellen Versuche werden an der EPF Lausanne/I-Bois insgesamt 5 verschiedene Holzleichtbeton-Mischungen zusammengestellt. Die Betonarbeiten erfolgen bei der IEZ Natterer GmbH in Saulburg/Wiesenfelden.

Um die groben Bestandteile der Späne herauszufiltern wird die Restholzfraktion vor der Verwendung gesiebt (Korngröße  $\leq 5$  mm). Zunächst vermischt man den Zement mit den ausgebreiteten Holzspänen auf einem sauberen und feuchten Betonboden. Anschließend erfolgt unter ständigem Mischen die Zugabe von etwa 50 % des Wasseranteils. Nach mehrminütigem Durchmischen wird das restliche Zugabewasser zugegeben mit weiterer daran anschließender Mischphase.

Rezeptur I stellt man exakt nach den vorgegebenen Massenangaben her, während bei

den Rezepturen II bis IV zur Erreichung der Regel-Konsistenz der Wasseranteil modifiziert werden muss.

Der Frischbeton wird in zylinderförmige Körper aus Pappe mit innenwandiger Kunststoffbeschichtung eingefüllt. Das Verdichten erfolgt mit Hilfe eines Holzstabs und seitlichem Klopfen mit einem Hammer.

Aufgrund des niedrigen Holzanteils (3 %) wird Rezeptur V nicht ausgeführt. Nach den Rezepturen I bis IV entscheidet man sich für die Erstellung einer weiteren Mischung (VI), im Zement-Holz-Wasser-Verhältnis zwischen Rezeptur I und II angesiedelt.

Die Probekörper werden mit einer Plastikkappe verschlossen und senkrecht gelagert. Je Probe erfolgt mit Hilfe einer Steinschneidemaschine die Anfertigung von mindestens 4 planparallele Scheiben  $d = 2,5$  cm (2 an der Oberseite und 2 an der Unterseite des Zylinders), die beschriftet an das ZAE Bayern geliefert werden.

#### 5.3.2 Wärmeschutz

Für den Wärmeschutz von Bauteilen wichtige bauphysikalische Einflussgrößen sind der Wärmedurchlasswiderstand  $[R]$ <sup>20</sup>, die Wärmeleitfähigkeit  $[\lambda]$  sowie der innere  $[R_{si}]$  und äußere Wärmeübergangswiderstand  $[R_{se}]$ . Ein Maß für die Wärmedämmung stellt der Wärmedurchgangskoeffizient  $[U]$  dar, der mit der Dicke eines Bauteils oder seiner Bauteilschichten, Schichtdicke  $[d]$ , zunimmt und mit größer werdender Wärmeleitfähigkeit abnimmt.<sup>21</sup>

$$U = 1 / \left( R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{se} \right)$$

Die Wärmeleitfähigkeit von Beton liegt im Bereich zwischen  $\geq 0,14$  W/mK (Porenbeton,  $\rho = 400$  bis  $800$  kg/m<sup>3</sup>) und  $2,1$  W/mK (Nor-

malbeton,  $\rho = 2400$  kg/m<sup>3</sup>). (Abb. 3.10) In diesen Werten sind sowohl die Lufteinschlüsse über die Rohdichte als auch die üblicherweise vorhandene Raumluftfeuchte über den praktischen Feuchtegehalt berücksichtigt.<sup>22</sup> Demgegenüber hat zum Beispiel Fichtenholz bei einer Rohdichte von  $400$  bis  $430$  kg/m<sup>3</sup> ein  $\lambda$  von  $0,10$  bis  $0,12$  W/mK. (Abb. 3.5)

#### Wärmeleitfähigkeit<sup>23</sup>

Wie die baukonstruktiven Untersuchungen zeigen, weist der Holzleichtbeton – je nach Holzanteil – zahlreiche Lufteinschlüsse und Poren auf. Da im Materialgefüge eingeschlossene Luft maßgeblich die Wärmedämmwirkung bestimmt, kann davon ausgegangen werden, dass mit zunehmendem Holzanteil, und damit abnehmender Rohdichte, die Wärmeleitfähigkeit sinkt.

Da sich die untersuchten Holzleichtbetonmischungen im Rohdichtebereich von Leichtbetonen bewegen, werden ähnliche  $\lambda$ -Werte erwartet. Gerade beim Holzleichtbeton, einem offenporigen Material mit einem relativ hohen Eigenfeuchteanteil, ist ferner zu berücksichtigen, dass die Bauteil-Feuchtigkeit die Wärmeleitfähigkeit negativ beeinflusst.

Die an der EPF Lausanne/I-Bois ermittelte Wärmeleitfähigkeit bewegt sich bei Rohdichten von  $700$  bis  $1450$  kg/m<sup>3</sup> im Bereich von  $0,10$  bis  $0,65$  W/mK. (Abb. 5.6)

Ergänzend zu diesen Untersuchungen werden beim ZAE Bayern in Würzburg Messungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit anhand von 5 repräsentativen Holzleichtbeton-Rezepturen (mit Rohdichten zwischen  $600$  und  $1720$  kg/m<sup>3</sup>) bei  $25$  °C unter Normatmosphäre durchgeführt.

Nach der Herstellung mit einer wassergekühlten Steinschneidemaschine werden die planparallelen Probekörper mit leichter Restfeuchte angeliefert. Die Lagerung der Probestücke

Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Bauphysikalische  
Eigenschaften

Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Bauphysikalische  
Eigenschaften

R.-Nr.	Probe- körper	Zement- Anteil	Wasser- Anteil	Holz- Anteil	Einwaage	Rohdichte $\rho$
		kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	mg	kg/m <sup>3</sup>
I	I / 7	300	525	280	8,80	947
	I / 16				7,14	975
	I / 26				10,55	892
II	II / 16	450	325	200	10,84	1.281
	II / 26				8,80	1.273
III	III / 4	600	280	135	9,55	1.287
	III / 13*				22,50	1.530
	III / 13				7,86	1.244
IV	IV / 4	800	300	70	7,70	1.701
	IV / 10				8,23	1.717
VI	VI / 8	410	445	250	9,05	600
	VI / 16				7,32	615

Abb. 5.7 Übersicht der Holzleichtbeton-Rezepturen

\* 7 Tage-Wert (Das Material war bei der Messung noch leicht feucht)

erfolgt anschließend bis zum 28 Tage-Wert unter Laborbedingungen.<sup>24</sup> (Abb. 5.7) Die Messungen werden 28 Tage nach Herstellung durchgeführt. Ergänzend findet an einer Probe der Rezeptur III bereits nach 7 Tagen eine Messung statt, um den Einfluss der Materialfeuchte auf die Wärmeleitfähigkeit exemplarisch abschätzen zu können.<sup>25</sup>

Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt anhand der "dynamischen Hitzdrahtmethode". (Abb. 5.8+7.52) "Dabei dient ein in die Probe eingebetteter Draht gleichzeitig als Heizelement und Temperatursensor. Während der Messung wird der Draht mit einer konstanten elektrischen Leistung beheizt. Die

zeitliche Entwicklung der mittleren Temperatur des Hitzdrahtes lässt sich anhand des temperaturabhängigen Drahtwiderstandes erfassen. Dieser Temperaturverlauf hängt von der Wärmeleitfähigkeit der Probe ab. Die Wärmeleitfähigkeit der Probe wird durch Anpassung einer analytischen Lösung an diesen zeitabhängigen Temperaturverlauf unter Berücksichtigung des thermischen Kontaktwiderstandes zwischen Probe und Draht sowie von Wärmeverlusten in axialer Richtung ermittelt."<sup>26</sup>

Zur Durchführung der Messungen müssen zunächst aus den vorhandenen Probenscheiben jeweils zwei gleichgroße quaderförmige

Stücke von etwa 12,5 x 2,5 x 4,0 cm herausgesägt werden. Über die genaue Bestimmung der Probenkörperabmessungen und anschließendes Wiegen erfolgt die Ermittlung der Rohdichte.

Nach der Bestimmung der Rohdichte fällt auf, dass die Rezeptur VI die leichteste Mischung darstellt, obwohl der Zementanteil mit 410 kg/m<sup>3</sup> ein gutes Drittel über dem der Rezeptur I liegt. In späteren Versuchen konnte die stoffliche Zusammensetzung indes weitgehend bestätigt werden.<sup>27</sup>

Für die Messung der Wärmeleitfähigkeit mit der dynamischen Hitzdrahtmethode werden "Platin-Drähte mit einem Durchmesser von 100  $\mu$ m verwendet. Bei Raumtemperatur werden an jeder Probe mindestens zehn Einzelmessungen durchgeführt. Die resultierenden zeitlichen Temperaturanstiege werden anschließend gemittelt. Die gemittelte Kurve wird zur Auswertung herangezogen."<sup>28</sup>

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit mit sinkendem Holzgehalt und damit mit zunehmender Dichte ansteigt. Die ermittelten Werte erstrecken sich in einem Bereich von 0,145 W/mK (600 kg/m<sup>3</sup>) bis 0,752 W/mK (1720 kg/m<sup>3</sup>). Damit bestätigt sich die Annahme, dass die Wärmeleitfähigkeit von Holzleichtbeton mit Leichtbeton vergleichbar ist. Im Vergleich der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an einer Probe (III/13) nach 7 Tagen konnte festgestellt werden, dass sich aufgrund der deutlich höheren Rohdichte (1530 kg/m<sup>3</sup>) mit 0,53 W/mK ein schlechterer Wert ergibt, als nach 28 Tagen (0,47 W/mK bei 1244 kg/m<sup>3</sup>). Nach dem vollständigen Erhärten verschiebt sich dieser Wert analog der gemittelten Wärmeleitfähigkeits-Kurve. Dieses Verhalten ist auf den durch die beschriebene Probenpräparation stark erhöhten Feuchtegehalt zurückzuführen. Vergleicht man die gemessenen Werte mit

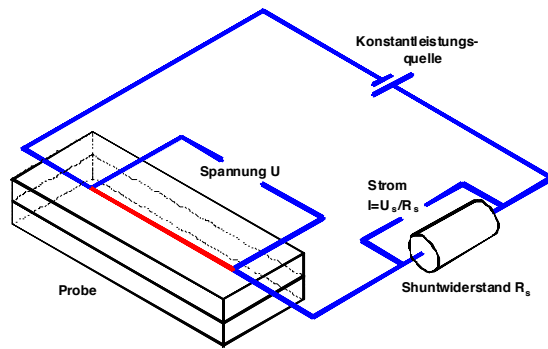


Abb. 5.8 Messprinzip der dynamischen Hitzdrahtmethode: In der Probe befindet sich der Hitzdraht. Aus der an ihm abfallenden Spannung  $U$  und der am Shunt-Widerstand abfallenden Spannung  $U_s$  ergibt sich die eingekoppelte Leistung und der resultierende Temperaturhub. Aus dessen zeitlicher Entwicklung wird die Wärmeleitfähigkeit der Probe bestimmt

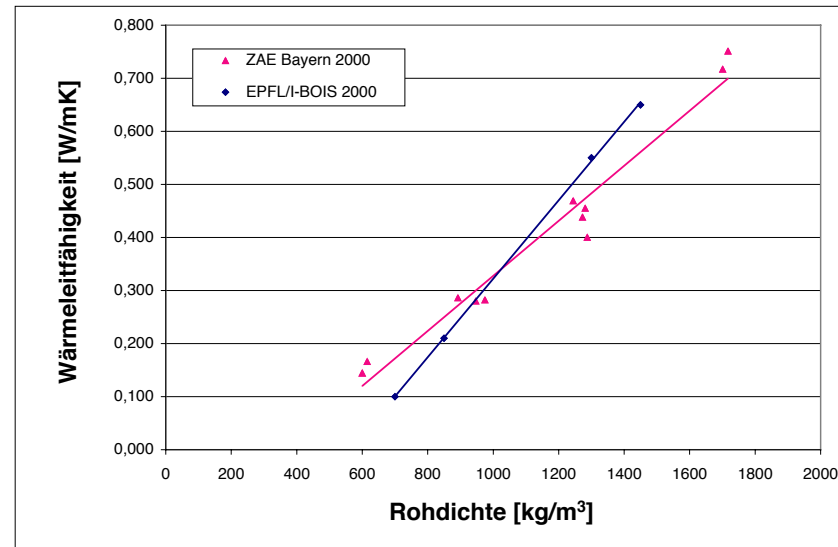


Abb. 5.9 Vergleich der Wärmeleitfähigkeitswerte von Holzleichtbeton an der EPF Lausanne/I-Boois 2000 (gemittelt) und beim ZAE Bayern 2000 untersuchten Proben

denen der EPF Lausanne/I-Bois<sup>29</sup> fällt eine leichte Verschiebung auf. Dies kann ebenso auf eine unterschiedliche Ermittlung der Rohdichtwerte zurückzuführen sein, wie auf abweichende Feuchtegehalte im Restholzsoriment. (Abb. 5.9)

Mit den Wärmeleitfähigkeitswerten im Bereich 0,15 bis 0,75 W/mK liegt der Holzleichtbeton zwischen den klassischen Dämmstoffen, wie Mineralfaser 0,40 (0,040 W/mK), Holzwolle-Leichtbauplatten ( $d \geq 15 \text{ mm} = 0,15 \text{ W/mK}$ )<sup>30</sup> und dem Normalziegel (MZ  $\approx 0,50$  bis 0,96 W/mK; KMZ  $\approx 0,81$  bis 1,20 W/mK; LLZ  $\approx 0,30$  bis 0,45 W/mK)<sup>31</sup>.

#### Wärmespeicherfähigkeit

Die Untersuchungen der Wärmespeicherfähigkeit – ebenfalls beim ZAE Bayern in Würzburg – erfolgen mit einem DSC 2920 der Fa.

TA Instruments, das neben “herkömmlichen ... auch temperaturmodulierte DDK Messungen erlaubt.

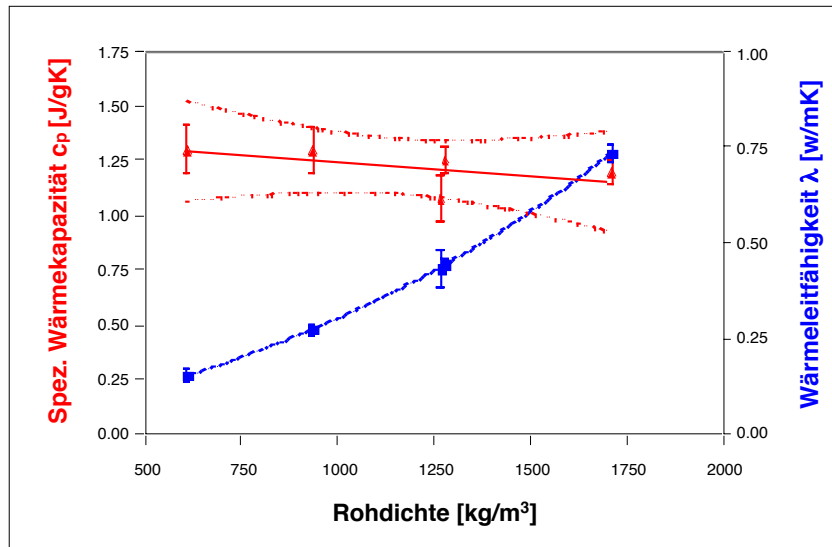
Bei dieser Messung wird der Differenz-Wärmestrom zwischen der Probe und einer Referenz als Funktion der Zeit und Temperatur bestimmt. Probe und Referenz werden in einer Messzelle gleichzeitig einem Temperaturprogramm unterworfen. Bei der modulierten DDK setzt sich die Heizrate aus einem linearen Anteil, der bei Quasi-Isothermen-Messungen auch konstant sein kann, und aus einem sinusförmig oszillierenden Anteil zusammen. Durch eine spezielle Auswertung des Differenz-Wärmestroms erhält man schließlich die reversible Materialeigenschaft Wärmekapazität und zusätzlich Informationen über nicht reversible thermische Effekte.”<sup>32</sup> Für die Bestimmung der spezifischen Wärme-

kapazität müssen die Probestücke vorbereitet werden, das heißt sie werden zunächst zerkleinert, in einem Aluminium-Tiegel eingebracht und anschließend verpresst. Die Durchführung der Messungen erfolgt unter einer dynamischen Stickstoffatmosphäre. (Abb. 7.54+7.56)

Die ermittelten Werte der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  zeigen eine leichte Abnahme bei den höheren Rohdichten. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass der Holz-Anteil bei ansteigender Dichte geringer ausfällt. Dadurch weist das Gesamtsystem Holzleichtbeton eine verringerte spezifische Wärmekapazität auf. Die Abweichungen in den Messergebnissen, in den Fehlerbalken dargestellt, sind wohl vor allem auf lokale Rohdichteschwankungen in den Proben und auf Einflüs-

Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Bauphysikalische  
Eigenschaften



se bei der Probepräparierung zurückzuführen.  
(Abb. 5.10+5.11)

Vergleicht man die Ergebnisse der spezifischen Wärmekapazität im ausgehärteten Zustand nach 28 Tagen (1,004 J/gK) ebenfalls mit dem 7-Tage-Wert der Probe III/13 so ist ein leicht höherer Wert (1,096 J/gK) festzustellen, obwohl die Rohdichte beim Aushärten absinkt. Da bezüglich des abnehmenden Feuchte-Gehalts eine Reihe von messtechnischen Unsicherheiten das Messergebnis stark beeinflussen können, wird diese Messreihe nicht weiter verfolgt. Der ermittelte 7-Tage-Wert dient einer ersten Einschätzung, ist indes für eine Probenbewertung nicht ausreichend aussagekräftig.

### 5.3.3 Feuchteschutz<sup>33</sup>

Der Schutz von Materialien und Bauteilen vor Durchfeuchtung, Wohnfeuchte, Kondensatbildung, Schlagregen etc., ist besonders wichtig, da sich Feuchte- und Wärmeschutz qualitativ gegenseitig beeinflussen. Ein wichtiger physikalischer Prozess ist hierbei die Diffusion, die den Transport von Wasserdampf durch ein Material beziehungsweise Bauteil maßgeblich bestimmt. Die Größe dieser Bewegung wird durch die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  angegeben. Dieser Faktor ist eine Vergleichszahl und benennt den Diffusi-

R.-Nr.	Probekörper	Rohdichte $\rho$	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	spez. Wärmekapazität $c_p$ (25 °C)
		kg/m <sup>3</sup>	W/mK	J/gK
VI	VI / 8	600	0,145	1,387
	VI / 16	615	0,167	1,248
I	I / 7	947	0,281	1,349
	I / 16	975	0,283	1,264
	I / 26	892	0,287	1,165
II	II / 26	1.273	0,439	1,301
	II / 16	1.281	0,456	1,212
III	III / 13	1.244	0,470	1,004
	III / 4	1.287	0,401	1,156
IV	IV / 4	1.701	0,718	1,239
	IV / 10	1.717	0,752	1,163

Abb. 5.10 Gemittelte Werte der spezifischen Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur in Abhängigkeit der gemittelten Probendichte

Abb. 5.11 Übersicht der Werte der spezifischen Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Holzleichtbeton-Rezepturen sortiert nach  $\lambda$  (ZAE Bayern, 2000)

onswiderstand einer Schicht gegen Dampfdurchtritt im Verhältnis zu einer Luftschicht gleicher Dicke, wobei  $\mu_{\text{Luft}}$  stets 1 ist.<sup>34</sup>

Bei den Untersuchungen an der EPF Lausanne/I-Bois wurden die bekannten Werte für Holzspanbeton ( $\mu = 4 - 6$ )<sup>35</sup> weitgehend bestätigt. Je nach Mischungsverhältnis können für Holzleichtbeton  $\mu$ -Werte zwischen 4/4 und 13/13 angenommen werden, die das Material als diffusionsoffen kennzeichnen.

Für Anwendungen im Bereich von Gebäudefassaden wie auch als Innenbauteil und in der Kombination mit (Massiv-)Holz sind für den Holzleichtbeton keine Nachteile zu erwarten. Allerdings ist eine Verwendung als Innenputz aufgrund des geringen Diffusionswiderstandes nur in entsprechenden Materialkombinationen und Schichtenaufbauten, mit hohem Diffusionswiderstand, sinnvoll.

Hygroskopische Stoffe reagieren stärker auf Veränderungen der Raumluftbedingungen und deren Feuchtigkeitsgehalt steht in enger Korrelation zur relativen Feuchte der Umgebungsluft. Daher wirkt sich eine Zu- beziehungsweise Abnahme der Luftfeuchte auch auf den Feuchtegehalt des Materials aus, das mit dieser in Berührung steht. Diese Ausgleichsvorgänge zwischen der Raumluft und den oberflächennahen Schichten der Raum umschließenden Flächen werden als Sorption (Wasseraufnahme-) und Desorption (Wasserabgabevermögen) bezeichnet. Diese Vorgänge beziehen sich nahezu ausschließlich auf die oberflächennahen Schichten.<sup>36</sup> Verminderte Schwankungen der Raumluftfeuchte sind für ein gleichmäßiges Raumklima erwünscht.

### 5.3.4 Schallschutz<sup>37</sup>

Anforderungen an den Schallschutz im Hochbau werden in der DIN 4109 geregelt. Dort

sind allerdings nur Mindestanforderungen an die Luft- und Trittschalldämmung von Bauteilen aufgestellt; darüber hinaus bestehen umfangreiche Empfehlungen für einen erhöhten Schallschutz. In der DIN-Norm wird unterschieden zwischen Schutz gegen Schallübertragung aus fremden Wohn- oder Arbeitsräumen und dem Schutz gegen Lärm von Außen, das heißt Körperschall, Trittschall und Luftschall.

Die Ausbreitung von Schallwellen erfolgt in den verschiedenen Medien unterschiedlich. Sie wird wesentlich durch die Stoffeigenschaften beeinflusst und ist unter anderem von der Temperatur abhängig. Dabei breitet sich der Schall umso langsamer aus, je geringer die Dichte und elastischer ein Stoff ist.

Im Rahmen der Versuchsarbeiten an der EPF Lausanne/I-Bois erfolgte in erster, theoretischer Näherung eine rechnerische Einschätzung sowie ein Abgleich mit Angaben aus der DIN 4109.

Aus diesen Voruntersuchungen resultiert, dass hinsichtlich des Körperschalls der Holzleichtbeton ein schlechter direkter Schalleiter ist. Daraus ergeben sich interessante Anwendungsgebiete insbesondere für Maßnahmen zur Trittschallverbesserung, zum Beispiel als Estrich-Belag.

Für eine Bewertung des Luftschallschutzes sind vor allem zwei Aspekte zu berücksichtigen:<sup>38</sup>

- Flächengewicht, je schwerer das Material, desto besser die Schalldämmwerte
- Mehrschichtigkeit, durch verschiedene (entkoppelte) Schichten im Aufbau können auch mit leichteren Bauteilen verbesserte Schall-Dämmwerte erzielt werden<sup>39</sup>

Darüber hinaus beeinflusst das Verhalten der einzelnen Schichten untereinander sowie etwaige Undichtigkeiten im Aufbau das Schall-

dämmmaß. Für einschalige Bauteile gilt in der Regel, dass der Luftschallschutz mit zunehmendem Gewicht verbessert ist. Dabei verhält sich das so genannte bewertete Schalldämm-Maß  $R'w$  zur Masse annähernd "logarithmisch linear".

Für die Schalldämmung ist auch die Größe von Hohlräumen von Bedeutung, denn größere Hohlräume verringern gegenüber gleichschweren Bauteilen ohne Hohlräume die Schalldämmung.

Putze, Trockenputze und Dämmplatten können Dämmwerte von Bauteilen gegen Luftschall nur entsprechend dem jeweiligen Anteil an der flächenbezogenen Masse verbessern. Putz wirkt sich dann günstig aus, wenn er eine dichtende Funktion hat. Bauteile aus luftdurchlässigen Materialien (zum Beispiel haufwerksporiger Leichtbeton) benötigen für einen ihrer Masse adäquaten Luftschallschutz ebenfalls einen zumindest einseitigen, dichten Putzbelag.

Holzleichtbeton kann daher, hinsichtlich der erreichbaren Luftschall-Dämmwerte, bei einschaligen Wandaufbauten nur im Bereich schalltechnisch nachrangiger Räume eingesetzt werden.

### 5.3.5 Brandschutz<sup>40</sup>

Die Anforderungen für die im Bauwesen verwendeten Baustoffe und Bauteile und ihr Verhalten im Brandfall sind in der DIN 4102-1 geregelt. Dabei werden Holz und Holzwerkstoffe als brennbare Baustoffe klassifiziert:

- schwerentflammbare Baustoffe (B1)  
z.B. Holzwolle-Leichtbauplatten
- normalentflammbare Baustoffe (B2)<sup>41</sup>  
z.B. Holz mit  $\rho \geq 400 \text{ kg/m}^3$ ;  $\geq 2 \text{ mm}$  Dicke

Holzleichtbeton setzt sich aus Zementstein (mindestens Feuerwiderstandsklasse F 90-A, feuerbeständig und nicht brennbarer Baustoff)

Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Bauphysikalische  
Eigenschaften

Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Thermische  
Charakterisierung  
unterschiedlicher  
Wandaufbauten

und Holz (mindestens Feuerwiderstandsklasse F 30-B, feuerhemmend) zusammen. Bei der Herstellung wird allgemein eine Mineralisierung des Holzes angenommen. Das Holz wird von dem Zementleim eingeschlossen und dieser Vorgang führt zu einer (schrittweisen) Versteinering. Danach ist das Brandverhalten des Holzes stark unterdrückt.

Die an der EPF Lausanne/I-Bois durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass eine ausreichende Mineralisierung nur bei Mischungsverhältnissen mit einem Zement-Anteil  $\geq 300 \text{ kg/m}^3$  gegeben ist. Um die Baustoffklasse A2 (nichtbrennbar, zum Beispiel Gipskartonplatten) zu erreichen darf der Holzmassenanteil 15 % der Gesamtmasse nicht übersteigen. Neben dem Massenverhältnis ist ein ausreichender W/Z-Wert bedeutsam, für eine gleichmäßige Umhüllung der Holzpartikel. Darüber hinaus sind auch Rauchentwicklung und Giftigkeit entstehender Gase zu berücksichtigen. Für Holzleichtbeton wird im Brandfall eine sehr berechenbare Rauch- und Gasentwicklung erwartet.

Unter Berücksichtigung statischer Erfordernisse und bei ausreichenden Mischungsverhältnissen kann Holzleichtbeton unter anderem für tragende und aussteifende Wände im Mehrgeschoßwohnungsbau (F 90-A, Feuerwiderstandsklasse F 90 und nichtbrennbaren Baustoffen) eingesetzt werden. Allerdings sind zur brandtechnischen Beurteilung solcher Wandkonstruktionen Normprüfungen nach DIN 4102-2 durchzuführen.

#### 5.4 Charakterisierung unterschiedlicher Wandaufbauten

Auf Basis der ermittelten bauphysikalischen Materialkennwerte und als Vorbereitung für eine Untersuchung zum thermischen Verhalten von Holzleichtbetonwänden wird eine überschlägige Abschätzungen verschiedener Wandaufbauten vorgenommen. Zwei wichtige Randbedingungen sind dabei zu erfüllen: Mit Außenwandstärken von  $\leq 30 \text{ cm}$  müssen Mindestanforderungen des Wärmeschutzes, das heißt U-Werte  $\leq 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , erreicht werden. Bei den untersuchten Aufbauten werden neben Brettstapelelementen (BS) aus Nadelholz die zwei Holzleichtbeton-Ausgangsmischun-

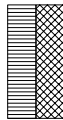
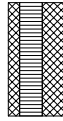
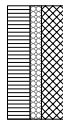
gen (HLB) mit den unterschiedlichen Rohdichten eingesetzt: (Abb. 5.7)

- Rezeptur VI,  $\rho = \approx 600 \text{ kg/m}^3$
- Rezeptur III,  $\rho = \approx 1250 \text{ kg/m}^3$

Eine Auswahl zeigt bei mehrschichtigen Wandaufbauten U-Werte zwischen  $0,45$  und  $0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ . (Abb. 5.12)

Daran anknüpfend erfolgt am ZAE Bayern, Abt. 4: Abteilung Solarthermie und Biomasse, in Garching eine Potenzialabschätzung mit verschiedenen Wandaufbauten in Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise. Ziel der Arbeiten ist eine thermische Charakterisierung des Holzleichtbetons als Bestandteil der Außenwand. Aus der Vielzahl unterschiedlicher Kombinationsmöglichkeiten wer-

Abb. 5.12 Überschlägige U-Wert-Berechnungen verschiedener Wandaufbauten mit Holzleichtbeton (HLB) und Brettstapel (BS)

Schichten	$\rho$		d	$\lambda$	U	Aufbau
	[ $\text{kg/m}^3$ ]					
Holzleichtbeton	600		0,15	0,156	0,45	
Brettstapel (Nadelholz)	420		0,15	0,14		
		$\Sigma$	0,3			
Holzleichtbeton	600		0,12	0,156	0,52	
Brettstapel (Nadelholz)	420		0,12	0,14		
Holzleichtbeton	1250		0,06	0,436		
		$\Sigma$	0,30			
Holzleichtbeton	600		0,12	0,156	0,33	
Climate Chips	80...140		0,06	0,05		
Brettstapel (Nadelholz)	420		0,12	0,14		
		$\Sigma$	0,30			



den drei mehrschichtige Aufbauten ausgewählt und ihre Leistungsfähigkeit als passive Bauelemente untersucht.

#### 5.4.1 Ausgewählte Parameter <sup>42</sup>

Für die Potenzialabschätzung müssen zunächst wichtige Randbedingungen geklärt und abgrenzt werden:

- Gebäudetypen
- Wohnfläche und Exposition
- Wärmedämmstandard

Die Definition der zu untersuchenden Gebäude und deren Wohnfläche pro Wohneinheit (WE) erfolgt in Anlehnung an vorliegende Modelle, die im Rahmen des Forschungsprojektes SOLEG am ZAE Bayern entwickelt wurden<sup>43</sup>:

- EFH = Einfamilienhaus, freistehend
- DHH = Doppelhaushälfte
- RMH = Reihenmittelhaus
- GW = Geschosswohnung

Die Gebäude werden mit Außenwänden aus Holzleichtbeton ausgestattet und hinsichtlich des thermischen Verhaltens mit Konstruktionen aus herkömmlichen Materialien verglichen. Die Berechnungen werden jeweils mit drei verschiedenen Aufbauten der Holzleichtbeton-Verbundbauweise durchgeführt.

Wesentliches Beurteilungskriterium ist der:

- Spezifische Jahres-Heizwärmebedarf des Gebäudes
- Temperaturverlauf im Raum

Die zugrunde gelegten Gebäudetypen werden mit ihren jeweiligen Außenwandaufbauten in dem dynamischen Simulationsprogramm TRNSYS (Version 15) abgebildet. Das thermische Verhalten wird im Jahreszyklus ermittelt und so der Heizwärmebedarf für die Raumheizung beziehungsweise die Temperaturverläufe berechnet.

Zur Ermittlung der Wohnfläche dienen die Bruttoabmessungen schematisierter Grund-

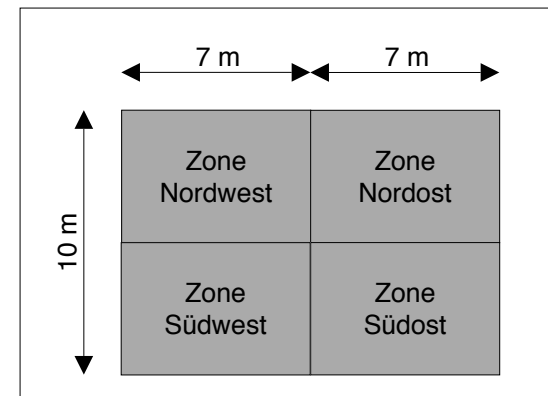
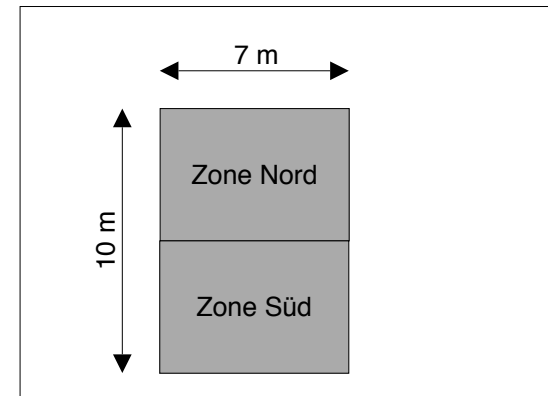
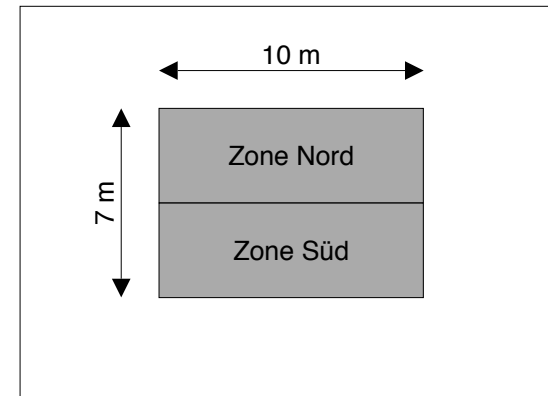
risse. (Abb. 5.13–5.15) Das Dach ist vereinfachend als Flachdach angesetzt und somit als einzelne äußere Hüllfläche gerechnet. Für die thermische Simulation wird die Gesamtstärke der Außen- und Innenwände mit berücksichtigt. Der Aufbau der Geschossdecken setzt sich aus 20 cm Leichtbeton, 4 cm Trittschalldämmung und 6 cm Estrich zusammen. Im Unterschied zu der in SOLEG vorgenommenen Modellierung der Gebäudetypen werden in den vorliegenden Untersuchungen die Innenwände anstelle einer massiven Ziegelwand, als Holzständerkonstruktionen mit beidseitiger Beplankung (Gipskartonplatten) abgebildet.

Jedem Gebäudetyp sind zwei unterschiedliche Wärmedämmstandards zugrunde gelegt, ein nach Wärmeschutzverordnung '95 gedämmtes Gebäude (WSVO '95) sowie ein Niedrigenergiehaus (NEH). (Abb. 5.16) Die Ausgangsvariante der thermischen Simulation bildet das nach WSVO '95 modellierte Gebäude.<sup>44</sup> Entsprechend "üblichen" Wärmeschutz-Standards wird als Referenzbeispiel

Abb. 5.13 Einfamilienhaus, Wohnfläche (WF) 140 m<sup>2</sup> auf zwei Geschossebenen, Energiebezugsfläche 140 m<sup>2</sup>, 1 WE

Abb. 5.14 Reihenmittelhaus, WF 140 m<sup>2</sup> auf zwei Geschossebenen bzw. Geschosswohnung, Wohnfläche 70 m<sup>2</sup>; Energiebezugsfläche 140 m<sup>2</sup> bzw. 70 m<sup>2</sup>; jeweils 1 WE

Abb. 5.15 Doppelhaus, WF 2 x 140 m<sup>2</sup>, jeweils auf zwei Geschossebenen, Energiebezugsfläche 280 m<sup>2</sup>, 2 WE. Für die Berechnungen in TRNSYS wurde exemplarisch die Osthälfte abgebildet



Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Thermische  
Charakterisierung  
unterschiedlicher  
Wandaufbauten

Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Thermische  
Charakterisierung  
unterschiedlicher  
Wandaufbauten

	Außenwand	Dach	Fenster	WRG
WSVO '95	36 cm Hochlochziegel	16 cm Dämmung	Wärmeschutz-Verglasung, Argon U = 1,4 [W/m <sup>2</sup> K] g = 0,62	nein
NEH	2 cm Holz 20 cm Dämmung 2 cm Holz	24 cm Dämmung	Wärmeschutz-Verglasung, Krypton U = 1,1 [W/m <sup>2</sup> K], g = 0,60	ja η = 0,7

Abb. 5.16 Dämmstandards der Gebäudetypen (WRG = Wärmerückgewinnung)  
 - Innenwände: Holzständerkonstruktion mit beidseitiger Beplankung (Gipskartonplatten)  
 - Gebäudedecken: 20 cm Leichtbeton, 4 cm Trittschalldämmung und 6 cm Estrichbelag

Abb. 5.17 Übersicht wesentlicher Parameter der Gebäudesimulation

	Beide Varianten	WSVO 1995	Niedrigenergiehaus (NEH)
Beheizte Fläche	140 m <sup>2</sup>		
Beheiztes Volumen	363 m <sup>3</sup>		
Interne Gewinne		4,5 W/m <sup>2</sup>	3,0 W/m <sup>2</sup>
Nachtabenkung	22 bis 6 Uhr auf 16 °C		
Luftwechselrate durch Infiltration		0,8 h <sup>-1</sup>	0,1 h <sup>-1</sup> nachts 0,2 h <sup>-1</sup> tagsüber
Luftwechsel durch mechanische Lüftungsanlage			0,8 h <sup>-1</sup> mit WRG (η = 0,7 bei Außen-temperaturen ≤ 15 °C)
Kühlung	ab 24 °C		

für die Außenwände ein Ziegelmauerwerk (Poroton, d = 36 cm) mit einem U-Wert von 0,50 W/m<sup>2</sup>K gewählt.

Als zweite Variante dient ein Niedrigenergiehaus mit (deutlich) verbessertem Wärmedämmstandard. Hier sind Außenwände als Holzständerkonstruktion mit 20 cm starker Dämmschicht und einer jeweils raumseitig und im Außenbereich angeordneten Holzbekleidung abgebildet. Neben ebenfalls wärmetechnisch besseren Fenstern (Krypton- statt Argonfüllung im Scheibenzwischenraum) wird eine mechanische Lüftungsanlage mit einer Wärmerückgewinnung (WRG, Wärmerückzahl η = 0,7) angesetzt.

Deckenaufbau, Innenwände sowie die Wohnflächen und Raumvolumina bleiben für beide Varianten gleich.

Zusätzlich sind bei dem Niedrigenergiehaus durch den Einsatz von energiesparenden Elektrogeräten die internen Wärmelasten gegenüber dem Gebäude nach WSVO '95 mit 3,0 W/m<sup>2</sup> statt 4,5 W/m<sup>2</sup> angesetzt. In beiden Fällen wird "zur Vermeidung einer Überbewertung solarer Gewinne ab einer Raumtemperatur von 24 °C eine ideale Kühlung simuliert, die überschüssige Wärme abführt. Der Luftaustausch zwischen der Nord- und Südzone ist mit 1/h angesetzt." (Abb. 5.17)

#### 5.4.2 Thermische Gebäudesimulation <sup>45</sup>

Der mit TRNSYS ermittelte Jahres-Heizwärmebedarf der Gebäudetypen zeigt, dass mit den zugrunde gelegten Außenwandaufbauten in Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise jeweils mindestens die Werte von Gebäuden in konventioneller Ziegelbauweise erreicht werden.

Bei dem Wandaufbau mit Kerndämmung, hinsichtlich des U-Wertes die leistungsfähigste Variante (HLB\_033, U-Wert = 0,33 W/m<sup>2</sup>K), fällt der Wärmebedarf gegenüber einer 'kon-

ventionellen' Bauweise sogar um ca. 15 bis 20 % geringer aus, bei gleichzeitig reduzierter Außenwandstärke (d = 30 cm; im Vergleich zum Mauerwerk d = 36 cm). (Abb. 5.18) Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass Heizwärmebedarfswerte einer Niedrigenergiebauweise mit den Holzleichtbeton-Wandaufbauten (noch) nicht zu erreichen sind. Die bereits sehr niedrigen Kennzahlen der thermischen Gebäudesimulation werden zwischen 16 % (Reihenmittelhaus) und 25 % (Einfamilienhaus) überschritten. (Abb. 5.19)

In einem weiteren Schritt soll untersucht werden, ob durch "kapazitive Effekte ein nutzbares Potenzial" zur Wärmepufferung (zum Beispiel als Überhitzungsschutz im Sommer) bei den Holzleichtbetonwänden besteht.

Hierfür wird der Aufbau mit dem raumseitig angeordneten schweren, wärmespeichernden Holzleichtbeton ausgewählt, der den höchsten U-Wert der drei untersuchten Varianten zeigt. Diese Schicht weist ein doppelt so hohes spezifisches Gewicht und eine um den Faktor 2 höhere volumenbezogene Wärmekapazität ( $\rho = 1250 \text{ kg/m}^3/0,18-0,26 \text{ kWh/m}^3\text{K}$  beziehungsweise  $\rho = 600 \text{ kg/m}^3/0,39-0,48 \text{ kWh/m}^3\text{K}$ ) auf, wie der im Außenbereich eingesetzte wärmedämmende Holzleichtbeton. Die Simulationsrechnungen erfolgen an dem oben genannten Gebäudemodell. Allerdings wird die simulierte, ideale Kühlung nicht berücksichtigt, um den Temperaturverlauf nicht zu verfälschen. Die Untersuchungen werden exemplarisch anhand der Südzone des Einfamilienhauses durchgeführt. (Abb. 5.13)

Betrachtet man die Einstrahlungsverhältnisse an einem heißen Sommertag zeigt sich, dass die Temperatur der raumseitigen Wandoberfläche bei dem schwereren Wandaufbau (HLB\_052, U-Wert =  $0,52 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) gegenüber dem Aufbau mit Kerndämmung (HLB\_033,

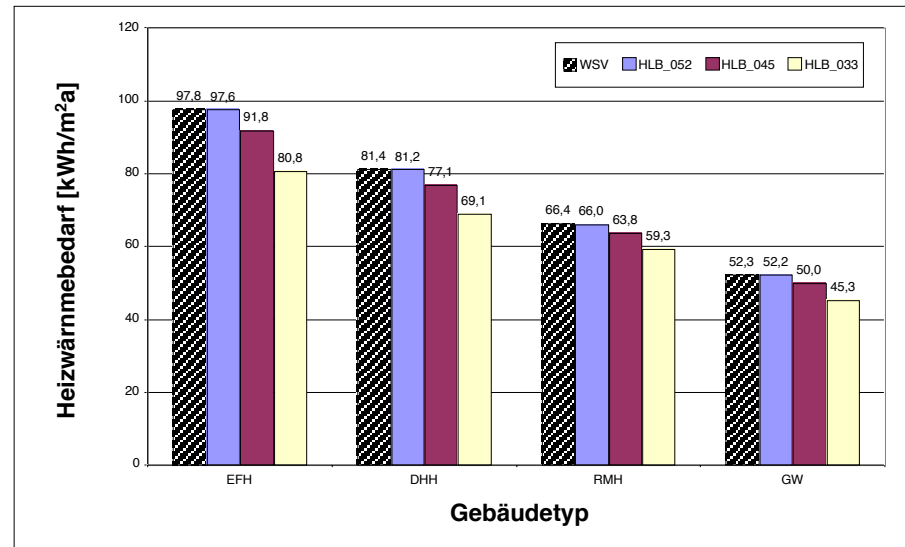
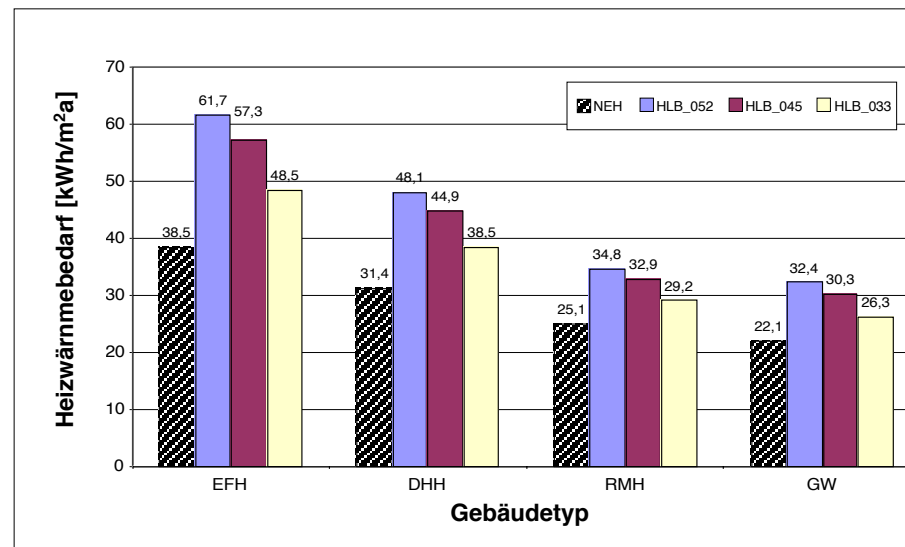


Abb. 5.18 Durch Simulation ermittelter, spezifischer Jahres-Heizwärmebedarf für die Gebäudetypen in Bauweise nach Wärmeschutzverordnung '95

Abb. 5.19 Durch Simulation ermittelter, spezifischer Jahres-Heizwärmebedarf für die Gebäudetypen in Niedrigenergiebauweise



Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Thermische  
Charakterisierung  
unterschiedlicher  
Wandaufbauten

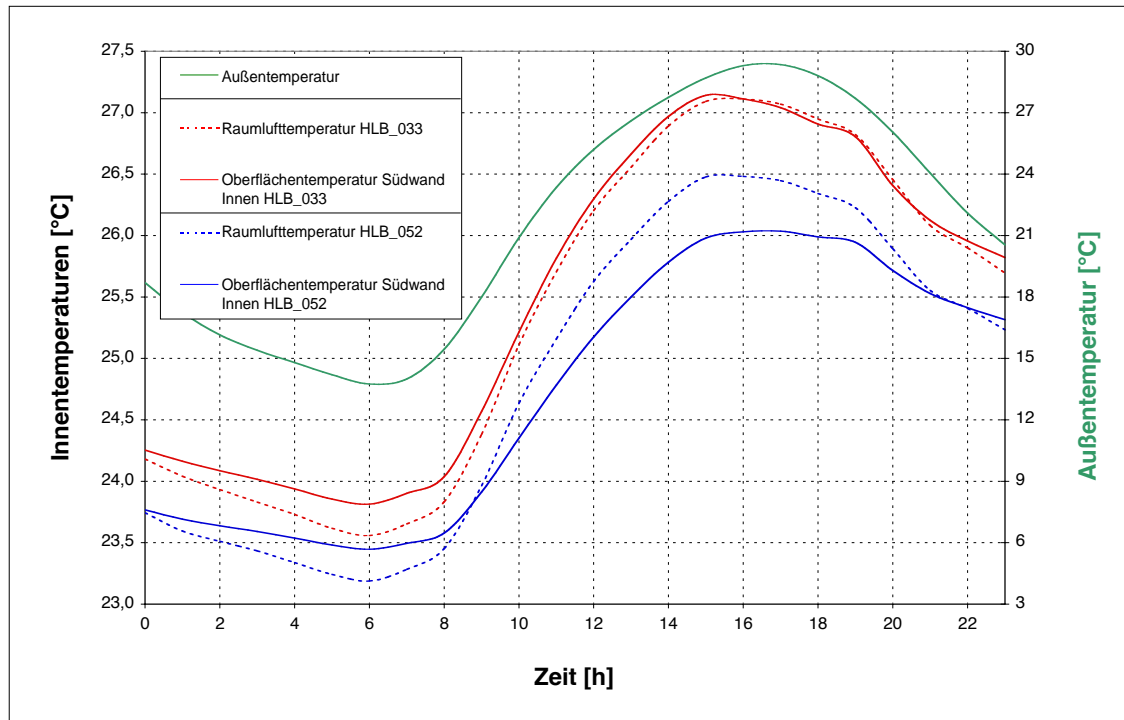


Abb. 5.20 Zeitlicher Verlauf von Außentemperatur, Raumlufttemperatur und Oberflächentemperatur in der Südzone (an der Innenseite der Südwand) für zwei Wandaufbauten in Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise an einem heißen Sommertag

U-Wert = 0,33 W/m<sup>2</sup>K) mit steigender Außentemperatur und zunehmender solarer Einstrahlung auf die Fassade etwas weniger stark ansteigt und in der Nacht etwas langsamer abnimmt. Auch der Anstieg in der Raumlufttemperatur fällt geringer aus. Wenn die Außenluft am Nachmittag nach 16 Uhr mit knapp 30 °C den Höchstwert erreicht, stellt sich zu den Oberflächen- und Raumlufttemperaturen ein  $\Delta T$  von etwa 1 K ein. Während bei der raumseitig angeordneten Brettstapelschicht kein Unterschied zwischen beiden Temperaturverläufen festzustellen ist,

liegt beim (schweren) Holzleichtbeton die Oberflächentemperatur leicht unter der Raumlufttemperatur. (Abb. 5.20) Dieser Effekt kann durch vergrößerte Bauteildicken der Holzleichtbeton-Schicht oder die Kombination mit Latentwärmespeichermaterialien gesteigert werden.

## 5.5 Zusammenfassung

Bei Holzleichtbeton wird gegenüber anderen Betonarten Holz als Zuschlagsstoff eingesetzt. Dieser Zuschlagsstoff fällt als Restprodukt bei der Holz verarbeitenden Industrie in Form von Sägespänen und Sägemehl an. Bisherige materialtechnische Untersuchungen<sup>46</sup> zeigen bezüglich des Zuschlagsstoffs Holz, dass sich eine kontinuierliche Sieblinie wie im 'klassischen' Betonbau nicht bewährt. Je kleiner die Schüttfraktion, desto höher sind die zu erwartenden statischen Eigenschaften. Bestimmte Holzinhaltstoffe (mono- und dimere Kohlenhydrate sowie phenolische Stoffe) erzeugen mit dem Kalk des Wassers weitgehend wasserunlösliche Calciumsalze, die auf der Zementoberfläche eine Sperrschicht ausbilden und die Zementhydratation verzögern oder gar verhindern können. Durch die Beigabe von Additiven und/oder eine Vormineralisierung der Holzpartikel lassen sich die abbindehemmenden Einflüsse minimieren.<sup>47</sup>

Im Vergleich zu Normalbeton kennzeichnet den Holzleichtbeton ein höherer Bindemittelgehalt. Das Material lässt sich sehr gut verarbeiten, sowohl per Hand als auch mit gängigen Mischgeräten. Da es keine Tendenz zu Entmischungen aufweist, ist analog zu Leichtbetonen je nach Konsistenz eine Guß-, Fließ- und Schütteinbringung möglich. Wesentlichen Einfluss auf Festigkeit und Verarbeitbarkeit hat der W/Z-Wert (Optimum zwischen 0,55 und 0,65) sowie das Holz/Zement-Verhältnis (mit steigendem Zementanteil erhöht sich die Druck- und Biegefestigkeit). Bei Stoffzusammensetzungen mit einer Rohdichte > 1300 kg/m<sup>3</sup>, Zementgehalt > 800 kg/m<sup>3</sup> können Druckfestigkeiten bis 13 N/mm<sup>2</sup>, Biegefestigkeiten bis 4,5 N/mm<sup>2</sup> und E-Moduli bis

5000 N/mm<sup>2</sup> erzielt werden.

Gegenüber herkömmlichen Holz- und Holzverbundwerkstoffen unterscheidet sich der Holzleichtbeton durch

- wesentlich höhere Rohdichten
- Spröbruchverhalten
- geringe hygri-sche Längenänderung

Aufgrund des hohen alkalischen Milieus im Holzleichtbeton und der Forderung nach Gewichtsreduktion sowie Querschnittsoptimierungen sind als Armierung Stahlbewehrungen mit Abstandhalter etc. nicht geeignet. In Folge intensiver Forschungsarbeiten zu modernen Bewehrungsarten im Betonbau, bestehen mit dem Einsatz textiler Gewebe leistungsfähige Alternativen, die darüber hinaus auch Kostenvorteile versprechen.<sup>48</sup>

Wie schon bei den historischen Beispielen gezeigt, zeichnet sich Holzleichtbeton durch eine Reihe vorteilhafter Bearbeitungseigenschaften aus. Das Material lässt sich sägen, nageln, schrauben. Auch bei der Oberflächenbearbeitung bestehen vielfältige Optionen.

Hinsichtlich der bauphysikalischen Eigenschaften zeigen bereits die Vorläufer eine Reihe positiver Merkmale und lassen erste Untersuchungen weitere Vorteile erkennen. Als hygroskopisch dampfdurchlässiger Baustoff ist das thermische Verhalten positiv zu bewerten, sowohl hinsichtlich der Wärmespeicherfähigkeit als auch der Wärmedämmung. Beide sind in hohem Maße abhängig von der Rohdichte des Materials und somit können Holzleichtbeton-Aufbauten durch gute Anpassungsmöglichkeiten in den Mischungen sowohl einen wirksamen sommerlichen als auch winterlichen Wärmeschutz leisten. Luftschall- und Trittschalldämmmaß lassen sich durch variierbare Rohdichten sowie mehrschichtigen Aufbauten ebenso erfüllen. Schallübertragung über Fugen wie auch Un-

dichtigkeiten in der Gebäudehülle können durch Verguss und entsprechende Anschlusslösungen unterbinden werden. Holzleichtbeton ist nicht brennbar und ab einer Dicke von 5 cm besteht eine Brandwiderstandsdauer von 90 Minuten.

Bei den Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit wurden Werte von 0,15 ( $\rho \approx 610 \text{ kg/m}^3$ ) bis 0,75 W/mK ( $\rho \approx 1710 \text{ kg/m}^3$ ) ermittelt. Damit liegt das Material bezüglich der Dämmwirkung im Bereich von Poren- und Leichtbetonen (mit haufwerksporigem Gefüge). Überschlägige Berechnungen lassen daher bei mehrschichtigen Wandaufbauten ( $d \leq 30 \text{ cm}$ , mit U-Werten zwischen 0,45 und 0,28 W/m<sup>2</sup>K) ein marktfähiges Potenzial als thermisch passives Außenwandbauteil erwarten.

Die spezifische Wärmekapazität von Holzleichtbeton (0,9 bis 1,5 J/gK) liegt zwischen Ziegelstein oder Beton und Schaumkunst- beziehungsweise pflanzlichen Faserdämmstoffen. Die Volumen bezogene Wärmekapazität (0,39 bis 0,48 /  $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ ) erreicht daher etwa 60 bis 70 % von Normalbeton (0,67 /  $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ ). Damit erscheint ein ausreichendes Potenzial als Material für thermisch aktive Bauteile gegeben. Ferner gilt das Material als diffusionsoffen und weist eine geringe kapillare Feuchtigkeitsleitung auf.

Die ermittelten Kennwerte zur Wärmeleitfähigkeit [ $\lambda$ ] und Wärmekapazität [ $c$ ] bilden die Basis für eine Potenzialabschätzung ausgewählter Wandaufbauten. Die Ergebnisse zeigen, dass Holzleichtbeton-Außenwände mit einer Wandstärke von  $\leq 30 \text{ cm}$  mindestens den Standard von konventioneller Ziegelbauweise (WSVO 1995) erreichen, und partiell der Heizwärmebedarf um 15 bis 20 % reduziert werden kann. Werte im Bereich der Niedrigenergiebauweise sind mit den bisher konzipierten Wandaufbauten jedoch (noch) nicht zu erzielen.

Anhand der baukonstruktiven und bauphysikalischen Eigenschaften zeigt sich, dass der Holzleichtbeton durchaus mit am Markt üblichen Baustoffen konkurrieren kann.

Bei einer vereinfachten, überschlägigen Abschätzung gegenüber Normalbeton muss der Holzleichtbeton auf jeden Fall als etwa 1/3 teurer eingestuft werden.<sup>49</sup> Dies liegt vor allem an dem erhöhten Bindemittelanteil und den niedrigen Kosten für normale Gesteinskörnungen. Vergleicht man den Holzleichtbeton jedoch mit Leichtbeton, bei dem als Zuschläge gewöhnlich hochfeste Stoffe wie Blähton etc. eingesetzt werden,<sup>50</sup> und mit dieser Baustoffgruppe müssen bezüglich der Marktpotenziale die Materialeigenschaften und Einsatzmöglichkeiten verglichen werden, verspricht dies Kostenvorteile zwischen 30 und 40 %, <sup>51</sup> da es sich beim Zuschlagsstoff Holz um ein vorhandenes Restprodukt handelt.

Nicht zuletzt wird der Primärenergieaufwand für Herstellung, Transport und Montage als optimal bezeichnet.<sup>52</sup> Das Material ist leicht zu transportieren, darüber hinaus einfach zu zerkleinern, abzubauen und auch als Zuschlagsstoff für neue Bauteile wiederzuverwenden. Ein weiterer ökologischer Gesichtspunkt ist die Verbundbauweise mit einer tragenden Schicht aus Massivholz, da bei solcherart Wand- und Deckenaufbauten der Einsatz von Holz in den Hochbaukonstruktionen noch einmal deutlich erhöht werden kann.<sup>53</sup> Holzleichtbeton eignet sich aufgrund der breiten Streuung seiner Materialeigenschaften in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Mischungsverhältnissen gleichermaßen für eine Verarbeitung als Fertigteil wie auch für eine Ortbetonherstellung. Darüber hinaus können Elemente für den Wand- und Deckenbereich sowohl als Außenbauteil, wie auch als Innenbauteil hergestellt werden.

Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Zusammenfassung

Holzleichtbeton  
passives Bauteil

Zusammenfassung

## Anmerkungen

- 1 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 11
- 2 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 23
- 3 Der untere Grenzbereich der Verarbeitbarkeit liegt bei einem Zementanteil von  $\geq 275 \text{ kg/m}^3$ . Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 25
- 4 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 23f.
- 5 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 25-74
- 6 Da für Restholzsortimente keine Siebkurven bestehen, musste an der EPF Lausanne/l-Bois durch empirische Verfahren ein Siebkurvenbereich definiert werden. Korngrößen bis max. 2,50 mm bezeichnet man als Feinstzuschlag. Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 45
- 7 Eine zusätzliche chemische und/oder mechanische Vorbehandlung des Holzes wurde nicht vorgenommen
- 8 Auch als "idealer" Wasser-Zement-Wert bezeichnet; diese Werte weist z.B. der Portlandzement, die wichtigste Zementart auf.
- 9 Vgl. Vollenschaar (Hg.), 25/1998, S. 308, 315, 382f.
- 10 Die Herstellung der Proben erfolgte mit konventionellen 20-Liter-Planetenrührmischern.
- 11 Steht im Widerspruch zum klassischen Betonbau. Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 65f.
- 12 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 69
- 13 Dabei unterscheidet sich die feuchtebedingte Längenänderung bei Zement (sehr kleiner Porenraum im Eigengefüge, ca. 0,05 %) und Holz (max. radiales Schwindmaß der Fichte ca. 7,8 %) enorm. Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 70
- 14 Vgl. Natterer, 2000d, S. 67ff.
- 15 Eine praxistaugliche Überprüfung dieser Einschätzungen steht noch aus, da der praktische Feuchtegehalt und die Baufeuchte in den Untersuchungen nicht berücksichtigt wurden.
- 16 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 61
- 17 Vgl. ZAE Bayern, 2000, S. 10
- 18 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 74
- 19 Vgl. Roider, 19.02.2001a
- 20  $R = d / \lambda$  [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]. Vgl. DIN EN ISO 6946, Oktober 2003
- 21 Vgl. DIN EN ISO 6946, Oktober 2003; Bundesarchitektenkammer (Hg.), 1996, S. 93f.
- 22 Vgl. Brandt/Moritz, 1995, S. 25ff.
- 23 Vgl. ZAE Bayern, 2000, S. 4ff.; Gliniorz/Natterer, 2000, S. 82ff.
- 24 Insgesamt liegen für die Rezepturen I und II je 3, für die Rezepturen III, IV und VI jeweils 2 Probekörper vor.
- 25 Vgl. ZAE Bayern, 2000, S. 3
- 26 ZAE Bayern, 2000, S. 4f.
- 27 Vgl. Kapitel 8.2.2 und 8.2.4
- 28 ZAE Bayern, 2000, S. 5
- 29 Gliniorz/Natterer, 2000, S. 84
- 30 Vgl. Wetzell (Hg.), 28/1998, S. 174ff.
- 31 Vgl. Vollenschaar (Hg.), 25/1998, S. 203
- 32 ZAE Bayern, 2000, S. 3
- 33 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 84-87; Fax IEZ Natterer GmbH, 28.11.2000
- 34 Vgl. Vollenschaar (Hg.), 25/1998, S. 700f.
- 35 Vgl. Beraus, 2001, S. 106
- 36 Vgl. Brandt/Moritz, 1995, S. 47ff.
- 37 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 78-82
- 38 Vgl. Vollenschaar (Hg.), 25/1998, S. 30
- 39 Z.B. in Verbindung mit der Brettstapelbauweise: Holzleichtbeton als leichter und damit schlechter direkter Schalleiter und Brettstapel als massiver und damit guter Luftschalldämmstoff. Vgl. Fax IEZ Natterer GmbH, 28.11.2000
- 40 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 75-78
- 41 Vgl. Brandt/Moritz, 1995, S. 83ff.
- 42 Vgl. Oberdorf, 08/2001, S. 1-4
- 43 Vgl. Niewianda, 2002, S. 3.11.1-3.11.21
- 44 "Die Geschosshöhe von 2,60 m und die maximale Anzahl von zwei Vollgeschossen berechtigen zum Nachweis des Wärmeschutzes nach dem Bauteilverfahren." Oberdorf, 08/2001, S. 4
- 45 Vgl. Oberdorf, 08/2001, S. 5-7
- 46 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 196
- 47 Diese chemischen Reaktionen zwischen dem Restholzsortiment, Zement und Wasser müssen allerdings noch weiter erforscht werden. Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 196
- 48 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 90-131
- 49 Preise: Schweiz 2000. Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 88f.
- 50 Vgl. Recycling-Glas des IPB etc.
- 51 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 87ff.; Fax IEZ Natterer GmbH, 28.11.2000
- 52 Vgl. Sambeth, 1996, S. 158-183
- 53 So beträgt der Einsatz von Holz in der Baukonstruktion heute nur mehr etwa 1/10 des Volumens, das um 1900 verbaut wurde. Vgl. Herzog, 22.05.2000

## 6 Holzleichtbeton als Material für thermisch aktive Bauteile

### 6.1 Stand der Entwicklung von Massivabsorbern

Für die Reduktion des thermischen Energieverbrauchs von Gebäuden stellt zunächst ein guter Wärmeschutz der Umschließungsflächen eine wirksame Maßnahme dar. Durch Nutzung von Solarenergie mittels passiver (direkter, über transparente beziehungsweise transluzente Flächen) und/oder aktiver (indirekter) Systeme besteht zusätzlich ein großes Substitutions- beziehungsweise Einsparungspotenzial von fossil erzeugter Energie. Die indirekten Systeme charakterisiert der apparative und maschinelle Zusatzaufwand, das heißt thermisch aktive Bauteile sind verrohrt und kombiniert mit Speicheranlagen, Wärmepumpe etc. und somit in haustechnische Anlagen eingebunden.

Jede Außenwand kann einen Teil der auftretenden Solarstrahlung aufnehmen und je nach Aufbau und Schichtenfolge an den Raum zeitversetzt abgeben. Der Ertrag einer konventionellen Wand fällt jedoch vergleichsweise gering aus. Durch modifizierte Aufbauten lassen sich die passiven solaren Gewinne von Außenwandkonstruktionen steigern. Die zusätzliche Anbringung einer Glasabdeckung beziehungsweise einer Transluzenten Wärmedämmschicht (TWD) kann den nutzbaren Anteil deutlich erhöhen.

Durch die vorgesezte Schicht wird der Strahlungsanteil entsprechend dem Transmissionsgrad des Materials abgemindert. Die Verlagerung der Absorberschicht in tiefere Bauteilschichten verringert jedoch die Wärmeverluste nach außen und erhöht die solaren Gewinne für den Raum. Zur Vermeidung von Überhitzung im Sommer ist allerdings insbesondere bei der Verwendung von TWD ein wirksamer Sonnenschutz erforderlich.

Darüber hinaus kann durch thermisch aktive Bauteile, wie Massivabsorber, die Brauchwasserbereitung beziehungsweise Raumheizung durch eine erweiterte Nutzung der Umweltenergie sinnvoll unterstützt werden. Mittels in die äußere Schicht der Außenwand eingelegter Leitungsrohre besteht die Möglichkeit über die passive Bauteilfunktion zusätzlich einen höheren Anteil der eingestrahelten Solarenergie zu nutzen. Über das die Rohre durchströmende Trägermedium (in der Regel Wasser oder Sole) wird die im Bauteil eingespeicherte Energie aufgenommen und direkt oder über eine Wärmepumpe einem Speicher zur Brauchwasserbereitung beziehungsweise Raumheizung zugeführt. So genannte Absorberwände, mit in Beton vergossenen Stahlrohren, werden erstmals um 1900 gebaut. Verstärkt erfolgt die Entwicklung von flüssigkeitsdurchströmten Beton-Außenbauteilen insbesondere nach 1973.<sup>1</sup> In der BR Deutschland werden bis Mitte der 90er Jahre mehr als 100.000 m<sup>2</sup> Massivabsorber hergestellt, die über 300.000 m<sup>2</sup> Wohn- und Nutzfläche umweltfreundlich beheizen.<sup>2</sup> Wie verbreitet dieser solartechnische Ansatz ist, zeigt der Vergleich, das seinerzeit die Fläche an Massivabsorbern etwa an die Fläche installierter Sonnenkollektoren herankommt.<sup>3</sup>

Massivabsorber sind flächige, massive Außenbauteile aus Beton – meist als Fertigteile produziert –, die der Umgebungswärme ausgesetzt sind. Diese Wärmetauscher absorbieren aus Erdreich, Luft und Regen, zum Teil Schnee, aber auch aus der Luftfeuchte über ihre Oberflächen und innenliegende Zirkulationsrohre Wärme.

In der Regel sind Massivabsorber an eine Wärmepumpe angeschlossen sind. Diese Kombination wird in Deutschland, Österreich und der Schweiz häufig als "Massiv-Absorber-

Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Stand der  
Entwicklung von  
Massivabsorbern

Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Stand der  
Entwicklung von  
Massivabsorbern

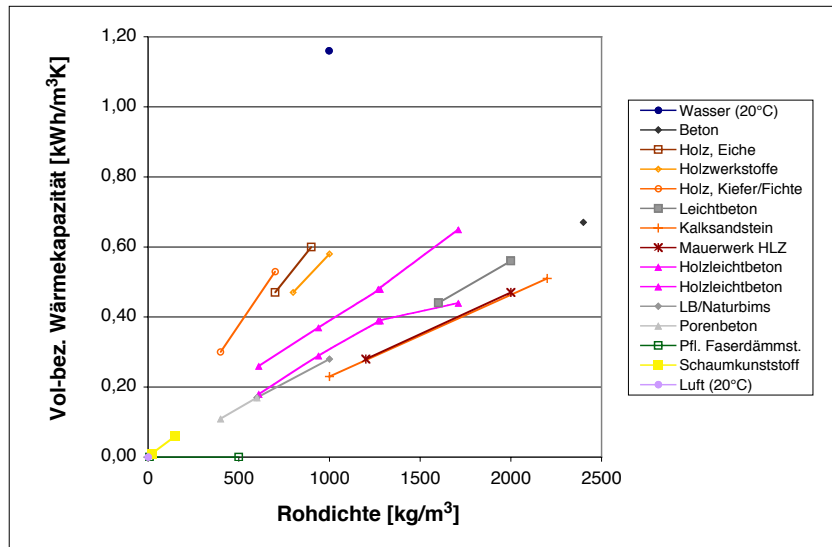


Abb. 6.1 Volumen bezogene Wärmekapazität S von (Bau-)Stoffen  
(Vgl. Schramek (Hg.), 69/1999, S. 92ff.; Schwarz, 1987, S. 10ff.)

Heizsystem<sup>4</sup> bezeichnet. Man unterscheidet

- luftgekoppelte
- luft-erdgekoppelte
- erdgekoppelte Systeme.<sup>5</sup>

Thermisch aktive Elemente lassen sich als Bauteilschicht sowohl außen als auch raumseitig anordnen. Dabei kann ein Teil der in den Raumumschließungsflächen eingespeicherten solaren Strahlung über ein Wärmeträgermedium an das Heizsystem abgegeben werden. Dieser Effekt ist besonders bei Leichtbauten von großem Interesse.<sup>6</sup>

Nachfolgend werden wesentliche Aspekte für die Entwicklung und den Einsatz von Massivabsorbern, als zusätzliche 'Kollektoren' und Speicher von Umweltenergie, als Basis für die experimentellen Arbeiten zusammenfassend behandelt und bilanziert.

### 6.1.1 Bauphysikalische Einflussgrößen und lokale Randbedingungen

Die thermische Leistungsfähigkeit von Baustoffen zum Betrieb von thermisch aktiven Bauteilen hängt wesentlich von der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  (W/mK) und der Wärmespeicherfähigkeit  $c$  (kJ/kgK) ab.

Beide Werte stehen in direkter Relation zur Rohdichte, woraus erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten von Baustoffen resultieren. Schwere, kompakte Materialien besitzen eine gute Wärmeleit- und Wärmespeicherfähigkeit, während leichte, poröse Stoffe nur geringe Werte aufweisen.

Zur Beurteilung des Wärmespeichervermögens ist die Volumen bezogene Wärmespeicherkapazität  $S^7$  eine wichtige Kenngröße. Sie bezeichnet, welche Energiemenge in einem bestimmten Volumen pro Kelvin Tempe-

raturdifferenz gespeichert werden kann. Wasser erreicht mit  $1,16 \text{ kWh/m}^3\text{K}$  einen sehr hohen Wert, während Beton von den gebräuchlichen Baustoffen mit  $0,67 \text{ kWh/m}^3\text{K}$  bei etwa 60 % der Speicherkapazität von Wasser liegt. Aufgrund des für Baustoffe recht hohen Wärmespeichervermögens und mit seiner guten Wärmeleitfähigkeit gilt Beton als in besonderer Weise für die Massivabsorbertechnik geeignet. (Abb. 6.1)

Im stationären Betrieb stellt der Beton zunächst einen Wärmeleitwiderstand dar, der von der Umweltwärme auf dem Weg durch das Bauteil zur Wärmeträgerflüssigkeit<sup>8</sup>, die in einer Rohrleitung den Absorber durchströmt, überwunden werden muss. Dieser fällt allerdings bei einer hohen Wärmeleitfähigkeit relativ gering aus.

Im so genannten Taktbetrieb stellt der Beton einen Zwischenspeicher für die absorbierte Umweltwärme dar. Diese wird in einer Stillstandphase gespeichert und erst unter günstigen Wärmeübergangsbedingungen, das heißt einer ausreichenden Temperaturdifferenz, vom Beton über das Rohr an das Trägermedium abgegeben. Da Wärme somit nicht nur der Umgebung, sondern vor allem auch dem Beton entzogen werden kann, können im Taktbetrieb hohe spezifische Leistungen von Betonabsorbern erzielt werden.<sup>9</sup> (Abb. 6.5)

Über Absorberflächen kann Umweltenergie direkt (passiv) oder indirekt (aktiv) genutzt werden. Der Umfang der Wärmeaufnahme wird zunächst durch Klimafaktoren, wie Strahlungsangebot, Außentemperatur, Windgeschwindigkeit, Niederschlag und Luftfeuchtigkeit bestimmt. Neben der jahreszeitlichen Änderung des Sonnenhöhenwinkels und des tageszeitlichen Wechsel bestimmt die Strahlungsintensität, das heißt direkte beziehungsweise diffuse Strahlung, das Angebot.



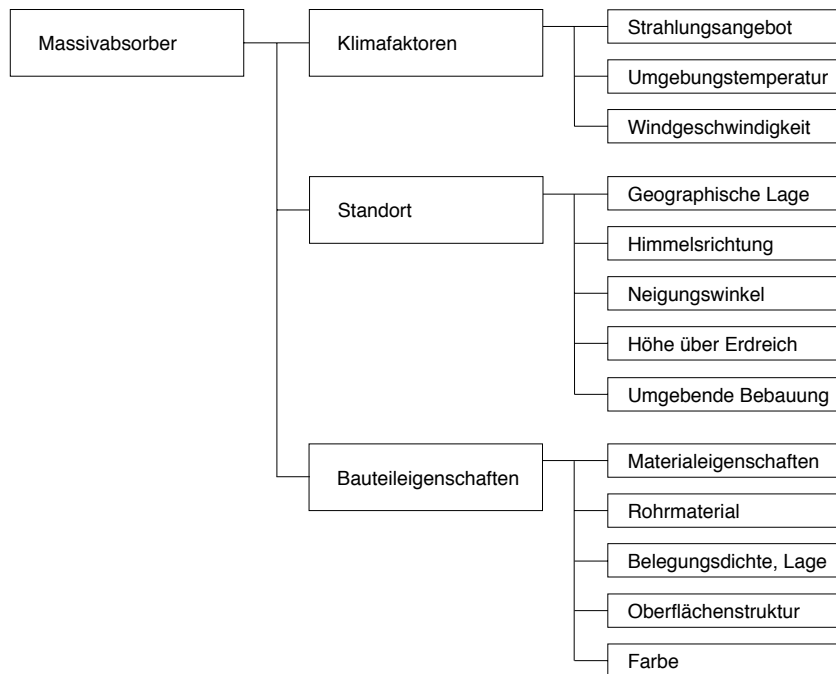


Abb. 6.2 Systematik thermisch aktiver Bauteile und wesentlicher Parameter (Vgl. Primus, 1995, S. 32f., 53)

Darüber hinaus sind die Reflektionsverhältnisse der umgebenden Flächen von Bedeutung; so kann auch aus den diffusen und reflektierten Strahlungsanteilen Umweltenergie aufgenommen werden.

Ferner beeinflussen bauliche Randbedingungen, wie Exposition, Flächenneigung, Höhe über Erdreich, Verschattung, Material oder Farbgebung die Leistungsfähigkeit von Massivabsorbern. (Abb. 6.2)

Für die Aufstellung von Massivabsorbern sind vor allem bebaute Gebiete geeignet, da hier in der Regel nur geringe Windgeschwindigkeiten auftreten und damit der Wärmeübergang von dem Absorber an die Luft relativ gering ist.

Bei Solarstrahlung erwärmen sich die Außenwandflächen unterschiedlich stark. Dunkle Oberflächen absorbieren einen höheren Strahlungsanteil als hellere Oberflächen.

Maßgebend für den Grad der Erwärmung ist das Absorptionsvermögen, bemessen mit der Absorptionszahl  $a_s$ . Eine Oberfläche mit  $a_s = 0,55$ , wie Beton glatt, absorbiert 55 % der auftreffenden Strahlung, die restlichen 45 % werden reflektiert. Helle Flächen besitzen eine Absorptionszahl zwischen 0,20 und 0,60.<sup>10</sup> (Abb. 6.3)

Für die Farbigekeit von Oberflächen wird von vielen Herstellern der so genannte Hellbezugswert (HBW in %) angegeben. Dieser kennzeichnet das Maß für die Absorptions-

Baustoff-Oberfläche	Absorptionszahl $a_s$
Dispersionsfarbe schwarz <sup>1</sup>	0,92
Schieferplatten	0,90
Dispersionsfarbe grau <sup>2</sup>	0,82
Faserzementplatten (1 Jahr)	0,70
Mineralischer Verputz	0,65
Kalksandstein	0,60
Ziegelsteine rot <sup>3</sup>	0,55–0,70
Granit	0,55
Beton glatt	0,55
Tannenholz	0,44
Kunststoffverputz weiß	0,36
Floatglas (6 mm)	0,12
Dispersionsfarbe weiß <sup>4</sup>	0,09

Abb. 6.3 Absorptionszahlen ausgewählter Baustoffe (Vgl. Schwarz, 1987, S. 29)

<sup>1</sup> (Pigment Eisenoxid)

<sup>2</sup> (3 Teile schwarz/1 Teil weiß)

<sup>3</sup> (je nach Helligkeit)

<sup>4</sup> (Pigment Titandioxid)

zahl des Farbtons und gibt das Reflexionsvermögen einer Farbe im Bereich des sichtbaren Lichtes (Spektralbereich zwischen 0,38 und 0,78  $\mu\text{m}$ ) an. Je kleiner der HBW, desto mehr Solarstrahlung kann auf der Bauteil-Oberfläche absorbiert und damit für Heizzwecke genutzt werden. Die Hellbezugswerte können sich bis um den Faktor 10 (Perlweiß 71 % und Oxydrot 8 %) unterscheiden.<sup>11</sup>

In Untersuchungen<sup>12</sup> ist festgestellt worden, dass die Absorptionszahl von Oberflächenbeschichtungen auf Dispersions-, Kunstharz-

Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Stand der  
Entwicklung von  
Massivabsorbern

Orientierung der Fläche	Solargewinnfaktor Sw		
	Farbe hell	Farbe mittel	Farbe dunkel
Wand Norden	0,98	0,96	0,94
Wand Osten/Westen	0,97	0,95	0,93
Wand Süden	0,96	0,95	0,90
Dach	0,96	0,93	0,90

Abb. 6.4 Solargewinnfaktoren für Außenwände  
und Dächer  
(Vgl. Schwarz, 1987, S. 32)

und Wasserglasbasis, wesentlich durch die Farbpigmente beeinflusst wird. Dagegen sind Bindemittel und Glanzgrad der Beschichtung sowie die Oberflächenstruktur (glatt, rau) von nachgeordneter Bedeutung. Für die Beurteilung der thermischen Leistungsfähigkeit einer Außenwand sind die Wärmeströme von der Oberfläche in beziehungsweise durch das Bauteil von Interesse. Durch die Absorption der Solarstrahlung werden zunächst die äußeren Bauteilschichten erwärmt, wobei die Temperatur der Oberfläche schnell die der Außenluft übersteigt. Während ein Teil der aufgenommenen Energie wieder an die kältere Umgebung abgegeben wird, setzen in der Wand Wärmeleitungs- und Wärmespeicherungsvorgänge ein. Die Wärme wandert durch den Wandquerschnitt und erreicht je nach Material und Auf-

bau gedämpft und zeitverschoben die raumseitige Oberfläche. Allerdings zeigt sich, dass über konventionelle Wandaufbauten nur ein sehr geringer Wärmegewinn zu erzielen ist. Die solaren Zusatzgewinne von opaken Außenwandkonstruktionen werden mit einem Abminderungsfaktor berücksichtigt. Der tatsächliche, effektive U-Wert [ $U_{eff}$ ] resultiert aus dem U-Wert [ $U_w$ ] und dem Solargewinnfaktor [ $Sw$ ] der Wand:

$$U_{eff} = U_w \cdot Sw$$

$Sw$  wird beeinflusst von dem Strahlungsangebot und der Exposition der Fläche, deren Beschattung sowie Farbgebung. Etwa 1 bis 6 % der absorbierten Strahlung kann von einer normalen Außenwand für Raumwärme genutzt werden.<sup>13</sup> (Abb. 6.4)

Untersuchungen<sup>14</sup> von mehrschichtigen Außenwandkonstruktionen zeigen, dass trotz der hohen Wärmeleitfähigkeit und des großen Wärmespeichervermögens von Beton keine höheren solaren Gewinne zu erzielen sind. Nach durchgeführten Berechnungen und Messungen lässt sich bei durchschnittlichen winterlichen Klimaverhältnissen<sup>15</sup> der U-Wert einer opaken Wand durch die Solarstrahlung um etwa 2 bis 12 % reduzieren.

### 6.1.2 Betonbauteile als thermisch aktives System

Prinzipiell kann jeder Betonkörper durch das Einlegen von Rohrschlangen beziehungsweise Rohrregistern als thermisch-aktives Bauteil genutzt werden. Durch ein Absorbersystem, das in Außenwandbauteile integriert ist, können zum einen solare Gewinne zusätzlich genutzt und zum anderen Transmissionswärmeverluste partiell wieder (zurück-)gewonnen werden. Ein etwaiger zusätzlicher

Wärmeentzug durch die stärkere Abkühlung der äußeren Bauteilschicht erscheint vernachlässigbar klein.<sup>16</sup>

Beton weist gegenüber anderen Materialien eine Reihe besonderer Merkmale auf:

- hervorragende Formbarkeit
- hohe Wärmeleitfähigkeit
- gute Wärmespeicherkapazität
- Dauerhaftigkeit<sup>17</sup>
- unproblematische Kombination mit Metall- und Kunststoffrohren

Durch die aufgrund der Masse relativ hohe Wärmespeicherkapazität, kann eine 15 cm dicke Betonplatte bei einer Temperaturänderung von 10 K pro m<sup>2</sup> Fläche etwa 1 kWh Wärmeenergie speichern. Praktische Anwendungen mit Beton-Massivabsorbern zeigen, dass sich je nach Aufbau und Leistung etwa 180 W Heizleistung pro m<sup>2</sup> Massivabsorberoberfläche erzielen lassen.<sup>18</sup>

Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherfähigkeit von Beton treten in dem Bauteilquerschnitt nur sehr geringe Temperaturdifferenzen auf und ist insgesamt eine langsame Änderung der Bauteiltemperatur festzustellen. Massivabsorber aus Beton reagieren stark gedämpft und zeitverzögert auf das Energieangebot und den Wärmeentzug durch das Wärmeträgermedium.

Weniger als die Hälfte der aus der Umwelt entzogenen Energie nimmt das flüssigkeitsdurchströmte Rohrregister unmittelbar auf. Der größere Teil wird zunächst von dem Beton zwischengespeichert und erst sukzessive abgegeben. "Die interne Speichermasse «glättet» die Unterschiede zwischen dem wechselnden Energieangebot aus der Umwelt und dem Entzug durch die Wärmepumpe."<sup>19</sup>

Von den Eigenschaften sind insbesondere:

- Bauteildicke (Einfluss der Masse)
- Mischungsverhältnis

- Oberflächenbeschaffenheit (Farbe, Oberflächengüte)
- Belegungsichte der Zirkulationsrohre<sup>20</sup> zu beachten.

Massivabsorber werden üblicherweise in Elementgrößen von 10 m<sup>2</sup> Fläche mit etwa 70 bis 80 m Zirkulationsrohr hergestellt. Wie bei einer Fußbodenheizung werden diese in einer Endlosschleife auf Bewehrungsmatten fixiert und in die Schalung eingelegt.

Da bei Massivabsorbern das Verrohrungssystem in das Bauteil eingegossen und somit nicht austauschbar ist, sind an die Haltbarkeit die gleichen Anforderungen wie an die Gebäudehülle beziehungsweise das Gebäude zu stellen.

Wesentliche Fragestellungen sind:

- Beständigkeit bei Frost-Tau-Wechsel
- Haltbarkeit des Verrohrungssystems

Bei entsprechender Zusammensetzung, Verarbeitung, Nachbehandlung (gegebenenfalls Oberflächenschutz) des Betons kann dieser den Anforderungen an ausreichende Frostbeständigkeit gut angepasst werden.

Hinsichtlich des Langzeitverhaltens insbesondere von Kunststoffrohren zeigen Untersuchungen, dass eine etwa dreifache Sicherheit bei einer Beanspruchungsdauer von bis zu 50 Jahren immer noch gegeben ist. Der Alterungsprozess ist von der Betriebstemperatur abhängig und setzt umso früher ein, je höher diese ist.<sup>21</sup>

Feuchte im Beton kann sowohl in festem, als auch im flüssigem oder gasförmigem Zustand auftreten und wirkt sich auf dessen Wärmeleitfähigkeit aus. Die Summe der Feuchte in den verschiedenen Aggregatzuständen wird als Wassergehalt  $w$  [kg/m<sup>3</sup>] bezeichnet.<sup>22</sup>

Im Betrieb sind Massivabsorber einem häufigen Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt. Deshalb wird die Wasseraufnahmefähigkeit durch einen hohen Zementgehalt vermindert.

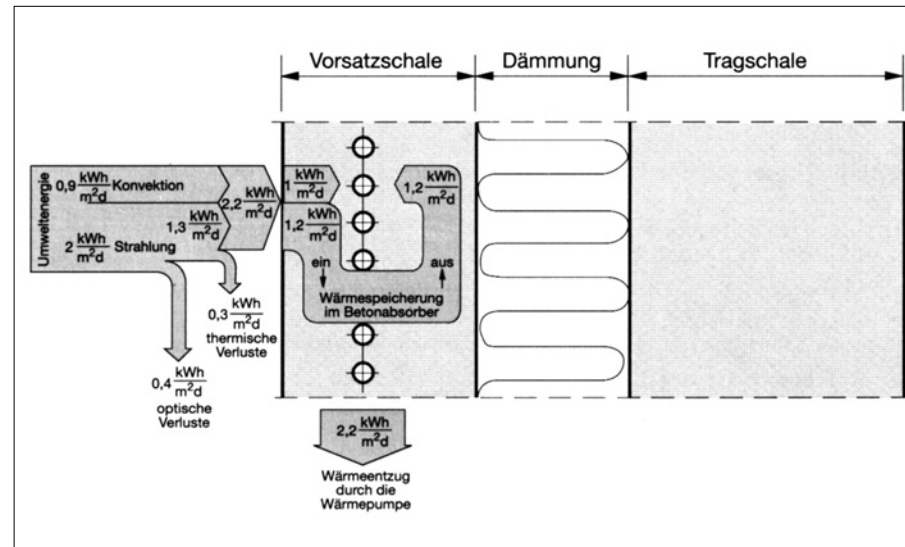


Abb. 6.5 Energiebilanz von Massivabsorbern

Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Stand der  
Entwicklung von  
Massivabsorbern

Abb. 6.6 Außenwandbauteile zur indirekten (aktiven) Solarenergienutzung

Thermisch aktives Bauteil	Thermisch aktives Bauteil mit Glas-Abdeckung	Thermisch aktives Bauteil mit TWD



Abb. 6.7 Geschößwohnungsbau mit Betonmassivabsorber beheizt

Die Frostbeständigkeit lässt sich darüber hinaus durch Beimischung von Zuschlagsstoffen und Luftporenbildner erhöhen. Spezielle Oberflächenbeschichtungen können ebenfalls die Wasseraufnahmekapazität herabsetzen. Bei diesen Maßnahmen ist allerdings auf die Sicherstellung einer ausreichenden Feuchtigkeitsabgabe des Betons an die Umgebungsluft zu achten.<sup>23</sup>

In der Regel wird wasserundurchlässiger Beton der Festigkeitsklasse C35/45 (früher B 35) verwendet, der für eine geeignete Betongüte folgende Anforderungen erfüllen muss:<sup>24</sup>

- Zementgehalt 350 kg/m<sup>3</sup>
- W/Z-Wert < 0,5
- hoher Frost-Tauwechsel-Widerstand
- Größtkorn des Zuschlags 16 mm,
- 3 kg/m<sup>3</sup> Luftporenbildner

Bei der Herstellung ist auf eine hohe Verdichtung, das heißt waagerechte Herstellung, die

Vermeidung von Kiesnestern und ausreichende Betondeckung zu achten.

Massivabsorber lassen sich in unterschiedliche Außenwandaufbauten (einschalig/mehrschalig) als Fassadenelemente integrieren. (Abb. 6.6) Freistehende Bauteile, wie Mauern oder Flachdachabsorber, ermöglichen eine beidseitige Absorption und können somit die Erträge erhöhen.

Prinzipiell können Massivabsorber in allen mit der Außenluft in Kontakt stehenden Bauteilen im Gebäude oder in baulichen Anlagen eingesetzt werden und übernehmen dabei auch bauliche Funktionen: Neben Fassadenelementen und Balkonbrüstungen insbesondere alle Typen von Einfriedungen und ebenso Nebenanlagen, wie Garagen. (Abb. 6.7)

Allerdings bleibt sowohl bei den seriell hergestellten als auch in Kleinserien produzierten Elementen das gestalterische Potenzial von Betonbauteilen bislang weitgehend ungenutzt.

### 6.1.3 Fazit

Am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen wurden ab Anfang 1980 eine Reihe von Detail-Untersuchungen zu Beton-Massivabsorbern durchgeführt,<sup>25</sup> unter anderem zur Leistung bei unterschiedlichen Oberflächenstrukturen, Bauteildicken und Farben. Weitere Parameter waren Feuchtigkeitsverhältnisse und Druckverluste in den Bauteilen sowie spezielle Oberflächenbeschichtungen.<sup>26</sup>

Diese Arbeiten zeigen, dass Massivabsorber aus Beton dann günstig arbeiten, wenn deren Wärmekapazität durch einen Taktbetrieb gut ausgenutzt werden kann. Aufgrund geringerer Windgeschwindigkeiten sind diese vor allem für Standorte in bebauten Gebieten geeignet. Thermisch aktive Betonfertigteile zeichnen sich neben erweiterten Nutzungspotenzialen

des Solarstrahlungsangebots durch eine Reihe von Vorteilen aus:<sup>27</sup>

- lassen sich prinzipiell überall aufstellen
- gute Auslegung möglich
- Betrieb bis in tiefen Temperaturen
- zusätzliche bauliche Funktionen
- keine speziellen baurechtlichen Genehmigungen

Massivabsorber aus Beton können im Werk vorgefertigt werden. Als integriertes Bauteil in der Gebäudehülle lassen sich durch Mehrfachfunktionen Kostenvorteile erzielen.

Optimierungspotenziale<sup>28</sup> werden im Bereich baukonstruktiver Aspekte gesehen

- begrenzte Absorberstärke
- hohe Rohrbelegungsichte bei gleichzeitig geringem Durchflusswiderstand
- Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit
- absorptionsfähige Farbe

Durch den Betrieb mit einer Wärmepumpenheizung sind gegenüber fossil betriebenen Heizungen (nennenswerte) Einsparungen an Schadstoffemissionen zu erzielen. Sowohl hinsichtlich von Primärenergieeinsparungen (zum Beispiel mit einer Elektrowärmepumpe allein aufgrund verbesserter Kraftwerkswirkungsgrade in 10 bis 20 Jahren etwa 20 bis 30 %) als auch in Bezug auf eine Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen gelten Massivabsorber als zukunftsorientiertes Heizsystem.<sup>29</sup>

## 6.2 Thermisch aktive Bauteile aus Holzleichtbeton

Anknüpfend an die Grundlagendarstellung von thermisch aktiven Bauteilen, das heißt Beton-Massivabsorber, sowie die skizzierte Übersicht zu baulichen und energetischen Randbedingungen erfolgen erste Überlegungen zur Verwendung von Holzleichtbeton in Verbindung mit Massivholz (vor allem Brettstapelelemente) für ein solcherart solar-technisches System.

Die bei der IEZ Natterer GmbH in Saulburg/Wiesenfelden konzipierten Aufbauten<sup>30</sup> waren so angelegt, dass die Materialeigenschaften des Holzleichtbetons zusätzlich mit Farbmischungen und strukturierten Oberflächen sowie unterschiedlichen Abdeckungsarten kombiniert wurden. Dabei ist man davon ausgegangen, dass zum einen das Maß an absorbiertem Solarstrahlung über eventuell eingefärbte Betonoberflächen erhöht, zum anderen durch die Strukturierung der Oberflächen (Riffelung, Wellung etc.) weniger Strahlung reflektiert und somit mehr Energie aufgenommen werden kann.

Eine vorgesetzte Glasscheibe reduziert die konvektiven Wärmeverluste. Die Verwendung von Transluzenter Wärmedämmung (TWD) an der Außenseite des Betons verstärkt diesen Prozess. Die Solarstrahlung geht durch die TWD und trifft auf die dahinter liegende Wand-/Absorberfläche. Der spezielle Aufbau der TWD minimiert die thermischen Verluste durch Leitung, Strahlung und Konvektion und verhindert derart, dass die gewonnene Wärme wieder nach außen abgegeben wird und wirkt gleichzeitig als Dämmung.<sup>31</sup>

Damit wird eine Steigerung der in Wärme umgewandelten Solarstrahlung im Bauteil erreicht, die über das in den Rohren befindliche

Trägermedium in die haustechnische Anlage eingespeist werden kann.

Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, diese Wärme zu nutzen:

- Die thermisch aktiven Bauteile (zum Beispiel aus Holzleichtbeton, Massivholz) wirken selbst als Wärmespeicher, beispielsweise um in Außenwänden zwischengepufferte Wärme zeitversetzt in den Wohnraum abzustrahlen, zur Unterstützung der Gebäudeheizung
- Die Wärme wird über ein Trägermedium (meist Sole oder Wasser) über eingebettete Rohre oder Rohrregister zu einem Brauchwasserspeicher geleitet (Unterstützung der Brauchwasser-Bereitung)
- Im Sommer wird das warme Wasser abgeleitet und durch kaltes Wasser ersetzt. Dadurch können die Wände an heißen Tagen gekühlt werden. Die thermisch aktiven Bauteile ermöglichen so einen verbesserten sommerlichen Wärmeschutz des Gebäudes

Die Untersuchungen im Rahmen der Arbeit umfassen die Schritte:

- Auswahl der Schichten und Aufbauten
- Bau von Versuchsrahmen
- Herstellung zweier Funktionsmodelle
- Vermessung unterschiedlicher Versuchsanordnungen
- Potenzialabschätzung

Die auf Basis der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise konzipierten Aufbauten setzen sich aus verschiedenen Materialien und Schichten zusammen:

- Massivholz, zum Beispiel Brettstapel, Dickholz
- Holzleichtbeton als Absorber, mit unterschiedlich bearbeiteter Oberfläche, glatt, geriffelt oder gewellt

- ein- oder mehrlagige Anordnung von Metall- beziehungsweise Kunststoffrohren zur Aufnahme des Wärmeträgermediums
- Farbige Betonoberfläche, durch Einsatz von Pigmenten, Kohlestaub, Ziegelmehl oder Dispersionsfarbe
- Abdeckung aus Glas oder Isolierglas
- Transluzente Wärmedämmung aus unterschiedlichen Werkstoffen (zum Beispiel Silikatglas, PMMA, Polycarbonat)

Daraus sollen an ausgewählten Beispielen Grundlagen für die Entwicklung von thermisch aktiven Bauteilen im Bereich der Gebäudefassade erarbeitet werden. Darüber hinaus wären ebenso Einsatzmöglichkeiten in Massivdächern und bei Umfriedungen oder als bewitterte Bodenbeläge (zum Beispiel bei Terrassen) denkbar.

Die Messergebnisse der Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und spezifischen Wärmekapazität  $c$  von Holzleichtbeton bilden die Basis für die Auswahl der Mischungen.

Es zeigt sich, dass die Volumen bezogene Wärmekapazität von einem (mittel-)schweren Holzleichtbeton ( $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ ) mit Werten zwischen 0,39 und 0,48 kWh/m<sup>3</sup>K bei etwa 60 bis 70 % der von Normalbeton (0,67 kWh/m<sup>3</sup>K /  $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$ ) liegt, bei einer Halbierung des spezifischen Gewichts.

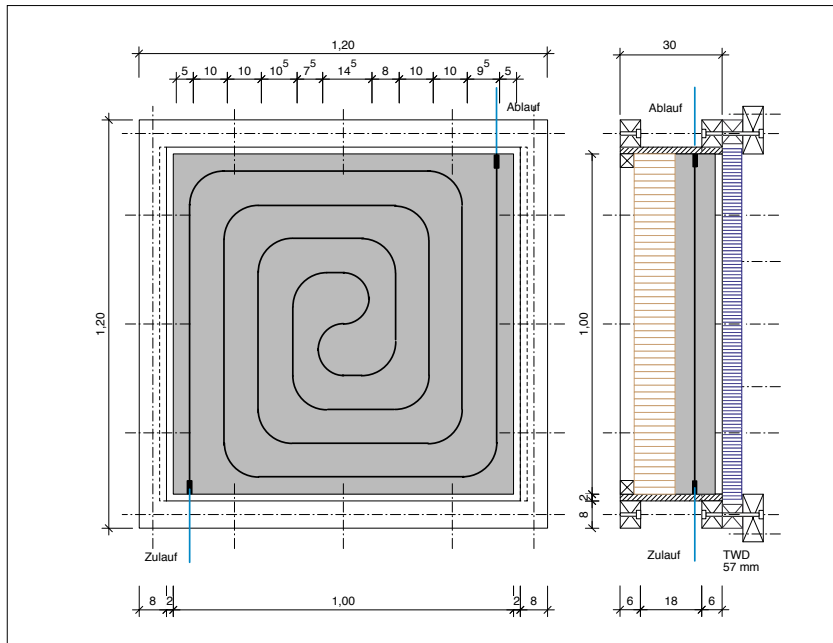
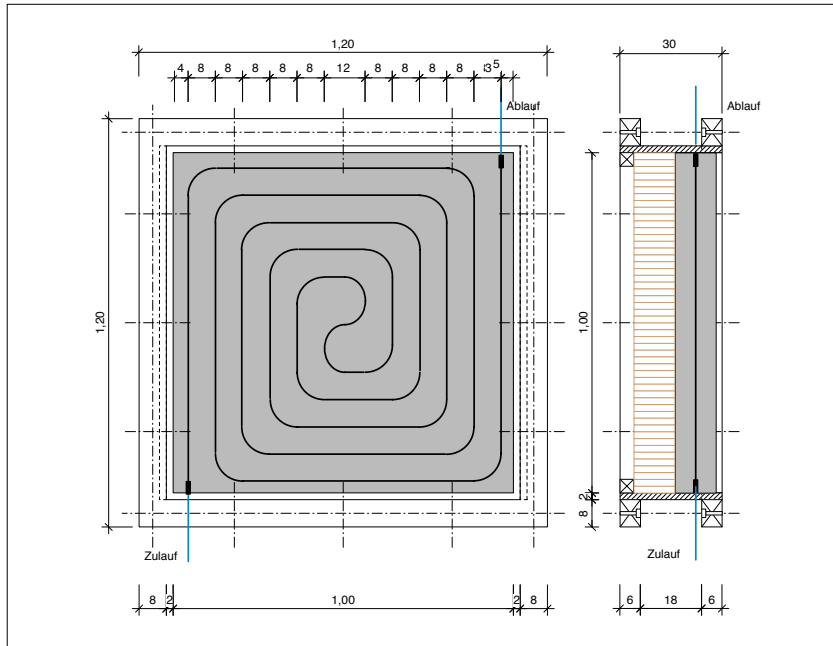
Um die Grenzbereiche des möglichen Leistungsspektrums von Holzleichtbeton als Material für thermisch aktive Bauteile ausloten zu können, wird als weitere Variante eine leichtere, mehr wärmedämmende Mischung herangezogen. Mit einer Rohdichte von etwa 600 kg/m<sup>3</sup> wird eine Volumen bezogene Wärmekapazität von 0,18 bis 0,26 kWh/m<sup>3</sup>K erreicht, das sind knapp 30 bis 40 % von Normalbeton. Auf Grundlage dieser Mischungen erfolgt die Herstellung von zwei verrohrten, 1 m<sup>2</sup> großen Funktionsmodellen mit einer verdichteten, glatten Bauteiloberfläche.

Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Thermisch aktive  
Bauteile aus  
Holzleichtbeton

Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Thermisch aktive  
Bauteile aus  
Holzleichtbeton



Für die experimentellen Arbeiten stehen zu-  
nächst zehn Varianten zur Diskussion:

- offener Absorber I / Holzleichtbeton (Rohdichte  $\rho \approx 1250$  [kg/m<sup>3</sup>])
- offener Absorber II / Holzleichtbeton (Rohdichte  $\rho \approx 600$  [kg/m<sup>3</sup>]) (Abb. 6.8)
- offener Absorber III / Holzleichtbeton (Rohdichte  $\rho \approx 1250$  [kg/m<sup>3</sup>]) mit Brettstapel (Nadelholz)
- offener Absorber IV / Holzleichtbeton (Rohdichte  $\rho \approx 600$  [kg/m<sup>3</sup>]) mit Brettstapel (Nadelholz)
- Absorber I hinter Glas
- Absorber II hinter Glas
- Absorber III hinter Glas
- Absorber IV hinter Glas
- Absorber II hinter TWD (Abb. 6.9)
- Absorber IV hinter TWD

Davon werden sechs Aufbauten für die exper-  
imentellen Untersuchungen ausgewählt.

Abb. 6.8 Versuchsaufbau: Holzleichtbeton als of-  
fener Absorber

Abb. 6.9 Versuchsaufbau: Brettstapel und Holz-  
leichtbeton mit TWD

## 6.3 Bau von Funktionsmodellen

### 6.3.1 Versuchsrahmen

Die Arbeit mit den Funktionsmodellen erfordert Versuchsrahmen die gut handhabbar sind und die einen (raschen) Wechsel der jeweils unterschiedlichen Schichtaufbauten ermöglichen. Die angefertigten Holzrahmen dienen der Aufnahme der Holzleichtbeton- und Brettstapel-Elemente und bilden eine robuste Rahmenkonstruktion (bei Bauteilgewichten bis zu 250 kg) für die Vermessung.

Aus Gewichtsgründen wird die Elementgröße auf 1 m<sup>2</sup> Bauteilfläche mit gleichen Kantenlängen begrenzt. Dieses Maß stellt gleichzeitig eine ausreichende Größe für 'belastbare' Messergebnisse dar.

Aufgrund der unterschiedlichen Schichtenfolgen und Aufbauhöhen bei der Abdeckung ist der Rahmen zweigeteilt, das heißt dieser besteht aus einem 'Unterbau' mit einer Bauhöhe von 30 cm, das Maximalmaß der vorgeschlagenen Außenwandkonstruktionen, der das Holzleichtbeton- und ein zusätzliches Brettstapелеlement aufnehmen kann. Ferner gibt es einen Vorsatzrahmen (d = 16 cm) für die Glasabdeckung und die TWD. (Abb. 6.10-6.12)

Unterbau und Vorsatzrahmen können mittels Schraubenbolzen kraftschlüssig verbunden und wieder gelöst werden.

### 6.3.2 Herstellung der Holzleichtbeton-Funktionsmodelle <sup>32</sup>

Die Herstellung der beiden Holzleichtbetonmischungen erfolgt auf Grundlage der Rezepturen, die im Kapitel 5.3.1 beschrieben sind. Über die unterschiedlichen Rohdichten hinaus ist die Kombination mit verschiedenen Verrohrungsweisen zu klären, die hinsichtlich

Rohrdurchmesser und Belegungsdichte unterschiedlich gewählt werden sollen, um ebenfalls Einflüsse zum Wärmeübergang von Bauteil/Rohrwandung/Wärmeträgerflüssigkeit und Durchflussgeschwindigkeit zumindest abschätzen zu können. Diese gleichzeitige Variation von spezifischer Wärmekapazität und Verrohrung dient angesichts eines knappen Versuchszeitraums zur Bewertung eines möglichst breiten Spektrums. Bei der späteren Simulation sind aufgrund der Parametermodifikation keine Probleme zu erwarten.

Für die Funktionsmodelle wird die

- Rezeptur III ( $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ ) mit einer 16 mm Aquatherm-Verrohrung
- Rezeptur VI ( $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ) mit einer 'konventionellen' 8 mm Kupfer-Verrohrung ausgewählt.<sup>33</sup>

Rezeptur III zeichnet sich durch einen hohen Zement- ( $600 \text{ kg/m}^3$ ) und niedrigen Holzgehalt ( $135 \text{ kg/m}^3$ ) aus, während Rezeptur VI bei hohem Holz- ( $250 \text{ kg/m}^3$ ) einen niedrigen Zementgehalt ( $410 \text{ kg/m}^3$ ) aufweist. Auf Basis der vorliegenden Rezepturen erfolgt die Herstellung der beiden Funktionsmodelle bei der IEZ Natterer GmbH in Saulburg/Wiesenfelden. Die zwei Elemente werden mit den Abmessungen 100 x 100 x 12 cm an zwei Arbeitstagen hergestellt.<sup>34</sup>

Abb. 6.10 Anfertigung von Versuchsrahmen im Technischen Zentrum der Fakultät für Architektur der TU München

Abb. 6.11 Elemente sind u.a. Rahmenunterbau, Vorsatzrahmen und Glasscheibe (4 mm)

Abb. 6.12 Zusammengesetzter Versuchsrahmen mit TWD-Element (57 mm)



Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Bau von  
Funktionsmodellen



Abb. 6.13 Siebung des Restholzsortiments

Abb. 6.14 Bearbeitung des Funktionsmodells, einbringen der zweiten Holzleichtbetonlage



Nach der Siebung des Restholzsortiments (Abb. 6.13) werden die Holzspäne in einen Betonmischer eingefüllt und der Zementanteil hinzugefügt. Nach mehrminütigem Mischen erfolgt die Zugabe von etwa 60 % des Anmachwassers. Nach einer weiteren Mischphase wird das restliche Wasser sukzessive beigefügt und bis zum Erreichen der Regelkonsistenz weiter vermischt.

Der Frischbeton wird in zwei Arbeitsgängen in die vorbereitete Holzschalung eingefüllt. Nach Fertigstellung der ersten Schicht wird etwa in Mittellage die schneckenförmige Verrohrung eingelegt. Bei Rezeptur III beträgt die einbetonierte Länge der Verrohrung  $l = 9,28$  m, bei Rezeptur VII  $l = 8,59$  m. (Abb. 6.14–6.17)

Das Verdichten erfolgt mit Hilfe eines Holzstabes und einer Schaufel, sowie mit Hammer-schlägen an die seitlichen Schalungsbretter. Anschließend folgt das Einbringen und Verdichten der zweiten Schicht. Die Oberflächen der fertigen Funktionsmodelle werden mit einer Kelle geglättet.<sup>35</sup>

Die Absorberoberflächen der Elemente werden zur besseren Lichtabsorption mit dem Grundierungsmittel Amphisilan Tiefgrund LF der Firma Caparol vorbehandelt und anschließend mit der Fassadenfarbe schwarz, ebenfalls Firma Caparol, gestrichen.

Beide Funktionsmodelle werden an die vorbereiteten Versuchsrahmen angepasst und mit einem Brettstapelelement ( $d = 12$  cm) für die experimentellen Untersuchungen vorbereitet.

Abb. 6.15 Verrohrung  $\varnothing 16$  mm "aquatherm"

Abb. 6.16 Betoniertes Funktionsmodell (schwer)

Abb. 6.17 HLB-Funktionsmodelle (schwer/links, leicht/rechts) und Brettstapel





## 6.4 Vermessung der Funktionsmodelle

Die thermische Leistungsvermessung wird einerseits für eine erste Einschätzung der Funktionsmodelle, andererseits als Grundlage für eine Potenzialabschätzung der thermisch aktiven Bauteile in Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise durchgeführt. Die Vermessung erfolgt auf der solaren Versuchsstation des ZAE Bayern, Abt. 4: Solarthermie und Biomasse, in Garching.

### 6.4.1 Der experimentelle Aufbau <sup>36</sup>

Die beiden Holzleichtbeton-Funktionsmodelle werden mit drei verschiedenen Aufbau-Varianten vermessen:

- OA, ohne Abdeckung: Die nicht abgedeckte Absorberfläche ist der Umgebung und natürlichen Bewitterung unmittelbar ausgesetzt.
- GL, mit Glasabdeckung: Der Absorberfläche ist eine Glasscheibe (4 mm) vorgesetzt
- TWD, mit transparenter Wärmedämmung: Abdeckung der Absorberfläche mit einem TWD-Element (ESG außen 5 mm,  $\approx$  10 mm Luftraum, glasklares PMMA, ESG innen 4 mm; Gesamtaufbau 57 mm)

Daraus resultieren insgesamt 6 verschiedene Versuchsaufbauten:

- HLB-LE\_OA (LE = leichtes Element)
- HLB-LE\_GL
- HLB-LE\_TWD
- HLB-SE\_OA (SE = schweres Element)
- HLB-SE\_GL
- HLB-SE\_TWD

Der Versuchsaufbau wird nach Süden orientiert und mit einer Neigung von  $35^\circ$  stationär aufgestellt. Ursprünglich war vorgesehen, diesen mittels eines "Solar-Trackers" nachführ-

bar einzurichten, da dies innerhalb weniger, fortlaufender Versuchstage einen besseren Abgleich bezüglich der Abweichungen in der Solargeometrie ermöglicht. Aufgrund des Gesamtgewichts vor allem des schwereren Funktionsmodells konnte dies mit den vorhandenen Geräten nicht realisiert werden.

Um störende Randdefekte während der Vermessung zu minimieren, wird der Rahmen mit 120 mm dicken Hartschaumplatten zusätzlich gedämmt. Ferner wird aufgrund der Bauteilhöhe ( $d = 12$  cm) auf den Einsatz des Vorsatzrahmens verzichtet, da durch den letztlich gewählten Aufbau mit großen Verschattungseffekten insbesondere bei der Glasabdeckung zu rechnen ist. Somit wird die Glas- beziehungsweise TWD-Abdeckung unmittelbar auf den Versuchsrahmen aufgebracht und abgedichtet. (Abb. 6.18+6.22)

Die Absorberfläche befindet sich 20 mm unterhalb der Oberkante des Versuchsrahmens. Um einen Luftstrom von der kühleren Rückseite (Brettstapel) zur Vorderseite zu unterbinden, werden die Fugen zwischen Rahmen und Funktionsmodell abgedichtet.

Zur Messung des Temperaturverlaufs in dem jeweiligen Funktionsmodell sind vor allem die oberflächennahen Schichten von besonderem Interesse. In verschiedenen Positionen werden Meßfühler zur Aufzeichnung der Temperaturen eingesetzt:

- TB<sub>vorn</sub>, nach 4,5 mm
  - TB<sub>1</sub>, nach 10 mm
  - TB<sub>2</sub>, nach 20 mm
  - TB<sub>mitte</sub>, in Bauteilmitte, das heißt Lage der Verrohrung)
  - TB<sub>rück</sub>, 4,5 mm unterhalb der Rückseite
- Zur Messung des Temperaturhubs in dem Wärmeträgermedium sind Temperaturfühler ebenfalls direkt am Ein- und Auslauf der Verrohrung angebracht. (Abb. 6.19+6.20, 6.23)

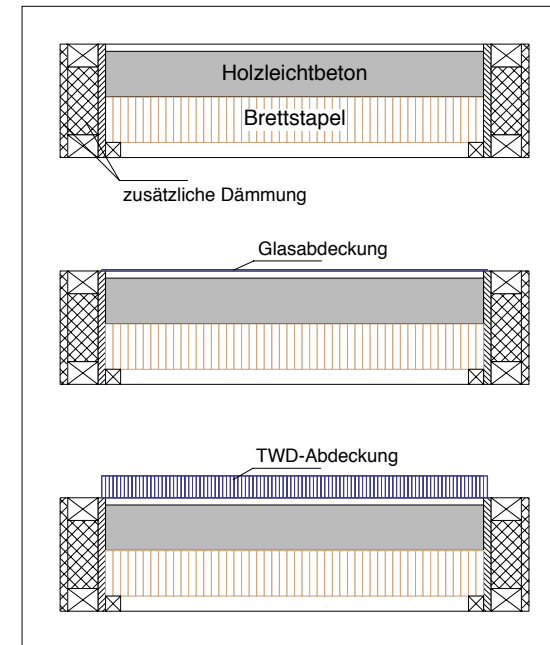
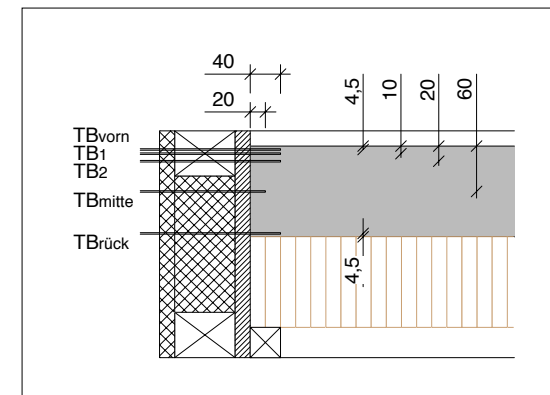


Abb. 6.18 Modifizierter Versuchsaufbau mit Holzleichtbeton und Brettstapel (oben), mit Glas-Abdeckung (mitte) und mit TWD-Abdeckung (unten)

Abb. 6.19 Lage der verschiedenen Temperaturfühler im Funktionsmodell [mm]



Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Vermessung der  
Funktionsmodelle

Sensoren	Messgröße	Einheit	Gerät
I_Sglob2	solare Bestrahlungsstärke in Bauteilebene	W/m <sup>2</sup>	Pyranometer
Volstrom	Volumenstrom	l/h	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser
Wind	Windgeschwindigkeit	m/s	Schalensternanemometer
TUmgebung	Umgebungstemperatur	°C	belüfteter Pt100
TBetk	Mediumeinströmtemperatur	°C	Pt100
TBetw	Mediumausströmtemperatur	°C	Pt100
TBvorn	Betonoberflächentemperatur	°C	Pt100
TBmitte	Betonkerntemperatur	°C	Pt100
TBrück	Betonrückwandtemperatur	°C	Pt100
TB1	1 cm unterhalb Oberfläche	°C	Pt100
TB2	2 cm unterhalb Oberfläche	°C	Pt100

Abb. 6.20 Die erfassten Messgrößen mit den jeweiligen Messgeräten

$\eta =$	Wirkungsgrad des Versuchsaufbaus
$\dot{Q}_k =$	kalorimetrisch ermittelte Leistung
$E_{glob} =$	gesamte solare Bestrahlungsstärke in Bauteilebene
$A =$	Aperturfläche des Versuchsaufbaus
$\dot{V} =$	Volumenstrom
$\rho =$	Rohdichte des Wärmeträgermediums
$cp =$	Wärmekapazität des Wärmeträgermediums
$T_w =$	Auslasstemperatur
$T_k =$	Einlasstemperatur

Abb. 6.21 Formelzeichen und Kenngrößen

#### 6.4.2 Durchführung der Vermessung <sup>37</sup>

Die Vermessung der 6 verschiedenen Aufbauten erfolgt jeweils über mehrere Tage in dem Zeitraum von 14.08.2001 bis zum 29.10.2001. Ermittelt wird ausschließlich die Leistung, die die Funktionsmodelle im Versuchsaufbau an das durchströmende Wärmeträgermedium abgeben. Eine Erfassung darüber hinausgehender Leistungsdaten (zum Beispiel Wärmeertrag durch den Plattenverbund) war nicht möglich.

“Für die Ermittlung des Wirkungsgrades wird die aus dem gemessenen Temperaturhub des durchströmenden Mediums bestimmte Leistung ins Verhältnis zum solaren Strahlungsangebot gesetzt.”<sup>38</sup> (Abb. 6.21)

Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_k}{E_{glob} \cdot A}$$

Leistung des Versuchsaufbaus:

$$\dot{Q}_k = \dot{V} \cdot \rho(T_v) \cdot cp(\bar{T}) \cdot \left( \frac{T_w - T_k}{2} \right)$$

“Eine Auswertung der Momentanwerte ist aufgrund der großen Wärmekapazität des Versuchsaufbaus nicht möglich. Das maximale Strahlungsangebot und die maximale Energieausbeute liegen typischerweise ca. 3,5 bis

4 Stunden auseinander. Zur Auswertung der Messdaten werden nur ganze Tage herangezogen und die Messgrößen über den gesamten Tag integriert.

Um vergleichbare Ergebnisse der verschiedenen Aufbauten zu erhalten, werden nur Tage mit ähnlichem Wetter miteinander verglichen. Zu diesem Zweck, sind Tage mit gleichen Aufbauten und ähnlichem (schönen) Wetter zu einem Mittelwert zusammengefasst worden.”<sup>39</sup>

#### 6.4.3 Messergebnisse <sup>40</sup>

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Witterungsverhältnisse im Vermessungszeitraum stehen nahezu keine Tage mit annähernd gleichen klimatischen Bedingungen zur Verfü-

gung. Daher muss bei der Auswertung auch auf Tage mit einer breiten Schwankung der Einstrahlung zurückgegriffen werden. Ferner ist zu berücksichtigen, dass sich aufgrund der relativ langen Messzeiten die täglichen Wetterbedingungen auch jahreszeitenbedingt verändern.

Daraus resultiert, dass bei "fortschreitender Messdauer auch an vergleichbar klaren Tagen das Energieangebot aufgrund kürzerer Sonnenscheindauer und flacheren Einfallswinkeln geringer ausfällt als zu Messbeginn. So variiert die tägliche solare Einstrahlung zwischen 7,5 kWh/m<sup>2</sup> und 4,1 kWh/m<sup>2</sup>."<sup>41</sup> Durch diese unterschiedlichen Randbedingungen ist ein direkter Vergleich zwischen den verschiedenen Aufbauten nur eingeschränkt möglich.

Bei der Betrachtung der so genannten Über-temperatur, also die Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Umgebungstemperatur und mittlerer Fluidtemperatur, zeigen sich bereits deutliche Unterschiede zwischen dem leichteren und schwereren Element. Die Werte variieren bei den verschiedenen Versuchsreihen zwischen 0,9 und 2,8 °C beziehungsweise 4 und 10,6 °C. (Abb. 6.24+6.25)

Die gemessenen Temperaturen in den Funktionsmodellen (Oberfläche, Kernbereich, Rückseite etc.) können nur als Anhaltswerte dienen. Zwar werden die jeweiligen Temperaturen exakt erfasst, aber die Anzahl und Lage der Messpunkte führt zu Einschränkungen. So kann nur ein Oberflächenfühler für die gesamte Oberflächentemperatur herangezogen werden, der sich aus bearbeitungstechnischen Gründen etwa 4,5 mm unterhalb der Oberfläche am Rand des Funktionsmodells befindet.

Daher ist davon auszugehen, dass die tatsächliche Oberflächentemperatur höher aus-

fällt, als die im Versuchsaufbau gemessene. Da die Fühler 4 cm beziehungsweise 2 cm tief von der Seite in den Holzleichtbeton eingebohrt sind, können ebenfalls störende Randdefekte nicht gänzlich ausgeschlossen werden. (Abb. 6.19)

Die vorliegenden Messergebnisse lassen folgendes erkennen:

- Der schwerere Holzleichtbeton (HLB-SE) schneidet bei den Versuchen letztlich aufgrund der Materialeigenschaften erwartungsgemäß deutlich besser ab, als das leichte Funktionsmodell (HLB-LE). Dies ist maßgeblich auf die bessere Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen. Die Messungen zeigen ferner, dass beim leichteren Holzleichtbeton zwar höhere Oberflächentemperaturen erreicht werden, demgegenüber sind aber die Kerntemperaturen niedriger als beim schweren Element.
- Beide Funktionsmodelle leisten ohne Abdeckung signifikant weniger als mit Abdeckung. Das ist unter anderem auf die dadurch bedingten hohen konvektiven Wärmeverluste zurückzuführen.
- Zwischen den beiden Abdeckungsarten (Glas und TWD) sind sowohl bei dem schwereren als auch bei dem leichteren Funktionsmodell keine auffälligen Leistungsunterschiede zu erkennen.<sup>42</sup>

Die Ergebnisse stellen eine erste Einschätzung der zu erwartenden energetischen Leistungsfähigkeit von Holzleichtbeton als Massivabsorber dar. Diese über den Versuchszeitraum von über 10 Wochen generierten Daten bilden eine wichtige Grundlage für die nachfolgende Modellierung von thermisch aktiven Bauteilen aus Holzleichtbeton in einer Gebäudesimulation.

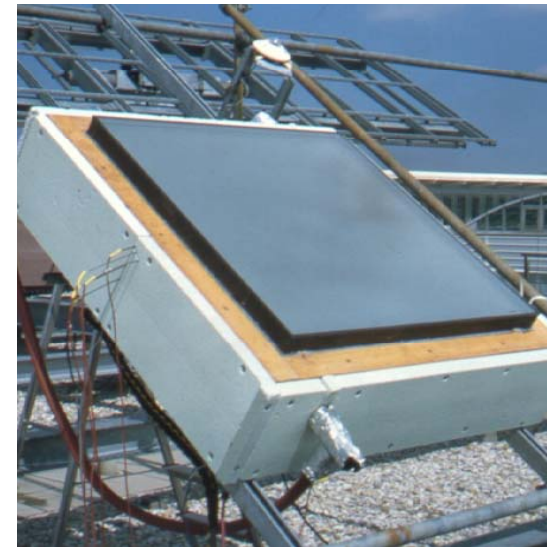


Abb. 6.22 Modifizierter Versuchsaufbau mit TWD-Abdeckung

Abb. 6.23 Rückseite des Versuchsaufbaus mit Heizung



Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Vermessung der  
Funktionsmodelle

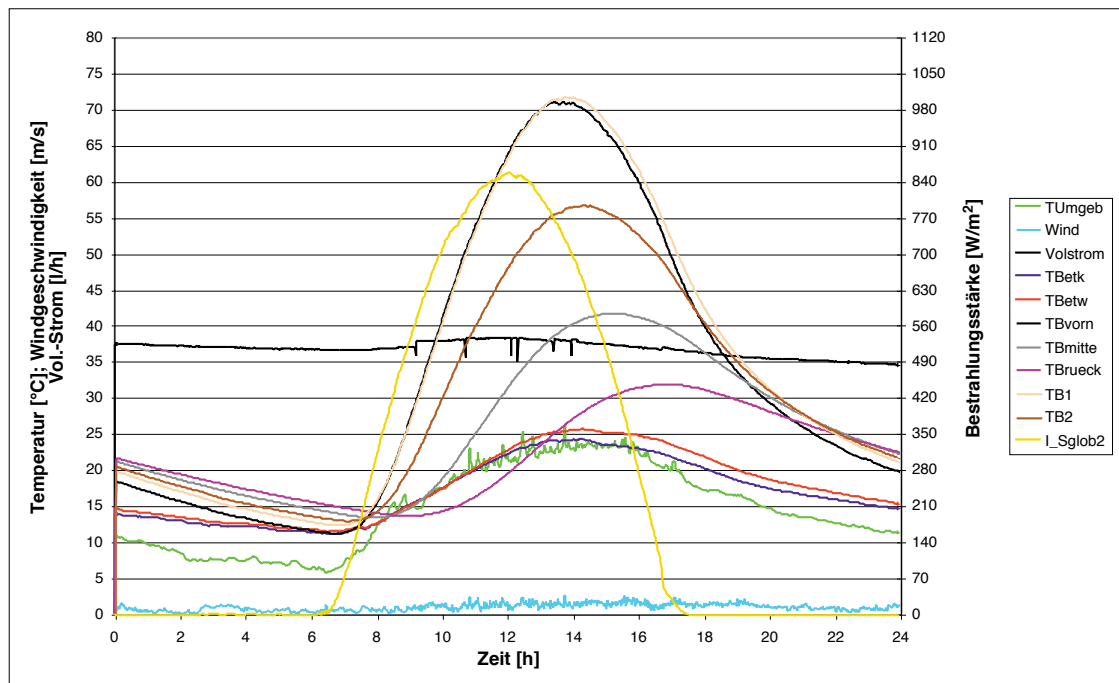
Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Vermessung der  
Funktionsmodelle

Versuchsaufbau	Rohdichte	Vol.-bez. Wärmekapazität	Strahlungsangebot	Energieausbeute	Wirkungsgrad	mittlere Übertemperatur	Temperaturhub	mittlere TUmgeb.	mittlere TBetmit	max. TOber
HLB_	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kWh/m <sup>3</sup> K]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[%]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
LE_OA	≈ 600	0,18–0,26	4,97	0,127	3	0,94	0,18	12,42	14,19	38,78
LE_GL			4,06	0,442	11	1,44	0,83	14,04	20,70	68,56
LE_TWD			5,25	0,790	15	2,80	0,82	14,02	25,22	68,72
SE_OA	≈ 1250	0,39–0,48	7,52	0,417	6	10,56	3,81	24,56	35,34	62,16
SE_GL			6,71	2,150	32	4,09	2,37	20,91	31,89	66,18
SE_TWD			7,55	1,992	26	6,20	2,49	15,55	28,09	53,67

Abb. 6.24 Messergebnisse der verschiedenen Versuchsaufbauten

Abb. 6.25 Tageskurven des "leichten" Funktionsmodells mit TWD-Abdeckung (HLB-LE\_TWD, am 13.10.2001)



## 6.5 Potenzialabschätzung

Ziel der auf die experimentellen Arbeiten folgenden Gebäudesimulation ist eine Potenzialabschätzung des Holzleichtbetons als Material für thermisch aktive Bauteile hinsichtlich des Heizwärmebedarfs eines Gebäudes. Die Durchführung der Arbeiten erfolgt ebenfalls am ZAE Bayern, Abt. 4: Solarthermie und Biomasse, in Garching.

### 6.5.1 Simulationskonzept<sup>43</sup>

Ein Gebäude mit Holzleichtbeton-Massivabsorbern in der Außenwand wird mit dem dynamischen Simulationsprogramm TRNSYS (Version 15) im Mehrzonen-Gebäudemodul modelliert. Die Untersuchungen erfolgen exemplarisch an dem Haustyp "Einfamilienhaus", der bereits für die Abschätzung des thermischen Verhaltens von Holzleichtbeton als Material für thermisch passive Bauteile verwendet wurde. (Abb. 5.13)

Die thermisch aktiven Bauteile aus Holzleichtbeton werden in der Südfassade angeordnet. Über ein in Rohrleitungen zirkulierendes Wärmeträgermedium sollen solare Warmegewinne in eine Fußbodenheizung der Nordzone transferiert werden, um dort, wo passive solare Gewinne nicht direkt wirksam sind, die Raumheizung zu unterstützen. (Abb. 6.26)

Die Abbildung der thermisch aktiven Bauteile im Simulationsprogramm entspricht dem Aufbau der messtechnisch untersuchten Funktionsmodelle: Auf der raumseitig angeordneten Brettstapelschicht ( $d = 12 \text{ cm}$ ) folgt eine außenliegende Schicht aus Holzleichtbeton ( $d = 12 \text{ cm}$ ), in deren Mittellage Metallrohrschlangen DN 8 in einem Verlegeabstand von 8 cm vergossen sind. Das Wärmeträgermedium ist Wasser.

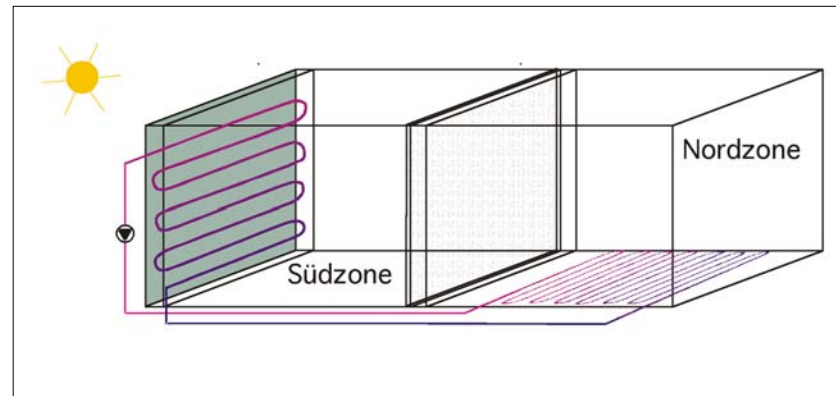


Abb. 6.26 Prinzip der Gebäudesimulation mit thermisch aktiven Bauteilen aus Holzleichtbeton zur Abschätzung des energetischen Potenzials

Die Gebäudesimulation erfolgt nur mit Holzleichtbeton der Rezeptur III ( $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ ; spezifische Wärmekapazität  $c_p = 1,08 \text{ kJ/kgK}$ , Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,436 \text{ W/mK}$ ). Darüber hinaus wird aufgrund der Ergebnisse aus den experimentellen Versuchen von den unterschiedlichen Aufbau-Varianten nur die Abdeckung mit einer Glasscheibe berücksichtigt. Zum einen weisen offene, das heißt nicht abgedeckte Absorberflächen einen niedrigen Systemwirkungsgrad auf, zum anderen konnte im Rahmen der Vermessung bei dem Einsatz einer transluzenten Wärmedämmung (TWD) keine nennenswerte Effizienzsteigerung nachgewiesen werden.

### 6.5.2 Parameterbestimmung<sup>44</sup>

Zur Entwicklung eines möglichst realitätsnahen Simulationsmodells, wird auf die Ergebnisse der Funktionsmodellvermessungen zurückgegriffen. Das thermische Verhalten von aktiven Bauteilen wird neben der spezifischen Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Materialien wesentlich durch das solare Absorptionsverhalten der Oberflä-

che und deren Wärmeübergangsverhalten zur Umgebungsluft beeinflusst. Beide Phänomene werden im Rechenmodell durch den solaren Absorptionskoeffizienten  $a_s$  und den Koeffizienten für den konvektiven Wärmeübergang  $h$  berücksichtigt.

Da die Kennwerte  $a_s$  und  $h$  erst ermittelt werden müssen, wird anhand der Messdaten eines repräsentativen Tages ein Fitting durchgeführt, eine gängige mathematische Methode zur Parameterangleichung zwischen experimentell ermittelten Daten und Simulationsergebnissen. Damit wird das gemessene Verhalten des Funktionsmodells an das simulierte Systemverhalten eines  $1,00 \text{ m}^2$  großen Fassadenelements angepasst.

“Mit den gemessenen Daten der Eintrittstemperatur und des Volumenstromes in das aktive Element sowie den Meteorologiedaten des Testreferenzjahres (TRY) München als Eingangsgrößen für das Simulationsmodell werden die Parameter  $a_s$  und  $h$  solange variiert, bis der errechnete Verlauf der Austrittstemperatur aus dem aktiven Element bei vergleich-

Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Potenzial-  
abschätzung

Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Potenzial-  
abschätzung

	Messung	Simulation
Einstrahlung	7,4 kWh	7,3 kWh
Energieeintrag 'Hydraulik'	2,2 kWh	2,1 kWh

Abb. 6.27 Als Tagesintegrale ermittelte Vergleichswerte aus Messung und Simulation

barer solarer Einstrahlung möglichst gut mit der Messung übereinstimmt.<sup>45</sup> Dadurch wird ein Abgleich zwischen gemessenem und berechnetem Energieeintrag in das Wärmeträgermedium erreicht. Hierbei zeigt sich für den ausgewählten Tag, unter vergleichbaren Strahlungsbedingungen, eine sehr gute Übereinstimmung von gemessener und simulierter Austrittstemperatur. (Abb. 6.27)

Die auftretenden deutlichen Unterschiede in den Oberflächentemperaturen zwischen Vermessung und Simulationsmodell resultieren aus dem beschriebenen Sachverhalt, dass bei den Funktionsmodellen der 'Oberflächen'-Messfühler seitlich und 4,5 mm unterhalb der Oberfläche des Holzleichtbeton angeordnet ist, während das Modell die Temperatur direkt auf der Oberfläche abbildet. (Abb. 6.28) Die im Rahmen der Parameterbestimmung ermittelten Zahlenwerte ergeben für den Koeffizienten des konvektiven Wärmeübergangs  $h = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  und den der solaren Absorption  $a_s = 0,95$ .

Beide Werte sind physikalisch plausibel. "Zu beachten ist, dass in dem Modell die Glasabdeckung nicht explizit berücksichtigt wird, so dass die entsprechenden Strahlungsverhältnisse in der Fassade (insbesondere im infra-

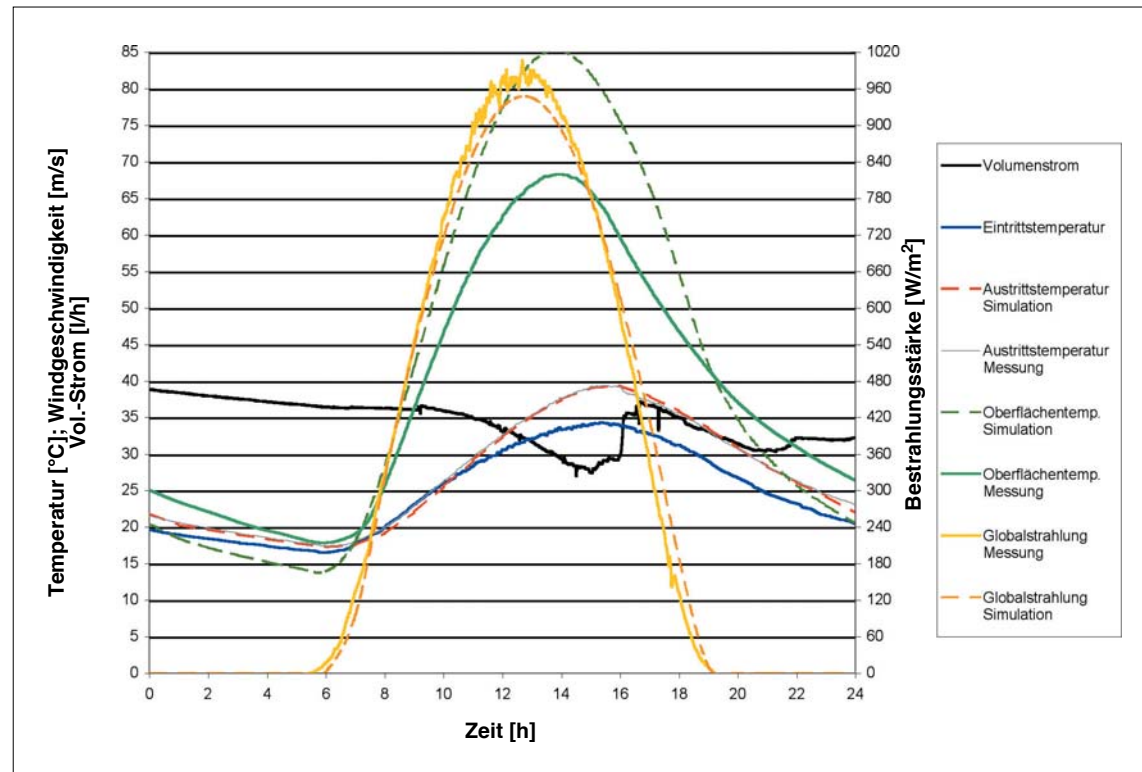
roten Spektrum) nicht abgebildet werden können. Die thermischen Auswirkungen sind über die Berechnungsmethode der beiden Parameter  $a_s$  und  $h$  im Modell jedoch mit impliziert."<sup>46</sup>

Erfahrungen zeigen, dass Versuche eine Glasscheibe explizit zu berücksichtigen, in der Regel nicht zu besseren Ergebnissen führen. Insgesamt wird die Modellbildung als "ausreichend gut" bewertet, was 'verlässliche' Aussagen im Rahmen der Potenzialabschätzung erwarten lässt.

### 6.5.3 Ergebnisse und Bilanzierung<sup>47</sup>

Auf Basis des erstellten Gebäudemodells kann nun der energetische Beitrag von Holzleichtbeton als Massivabsorber zur Deckung des Heizwärmebedarfs, in diesem Fall eines Einfamilienhauses, bewertet werden. Bei dem untersuchten Gebäude werden 80 % (36,8 m<sup>2</sup>) der opaken südorientierten Außenwand (46,0 m<sup>2</sup>) mit thermisch aktiven Bauteilen ausgebildet. Die Jahressimulation erfolgt mit den Wetterdaten des Testreferenzjahres (TRY) Würzburg.

Abb. 6.28 Zeitlicher Verlauf verschiedener Größen im Tagesgang gemäß Messung (Messdaten vom 25.08.2001) und Simulation (Meteorologiedaten der Simulation eines vergleichbaren Tages aus dem Testreferenzjahr (TRY) Würzburg)



Der Aufbau des solaren Heizsystems ist derart ausgelegt, dass der Massivabsorber immer dann in Betrieb geht, wenn dessen Temperatur über der Temperatur in der Fußbodenheizung der Nordzone liegt. Besteht zu diesem Zeitpunkt ein Wärmebedarf wird das konventionelle Heizsystem um einen gewissen Umfang entlastet. Als Referenzszenario dient dasselbe Gebäudemodell mit einer nicht verrohrten Außenwand aus Holzleichtbeton.

Vergleicht man den zeitlichen Verlauf der Ein- und Austrittstemperatur der thermisch aktiven Bauteile und die Heizleistung mit und ohne aktivem System an einem 'sonnigen' Wintertag, so zeigt sich, dass die erforderliche Heizleistung der 'konventionellen' Anlage in der Nordzone bei Betrieb des Absorbers deutlich geringer ausfällt, als ohne Unterstützung durch die solaren Gewinne aus der Südfassade. (Abb. 6.29) Die Heizleistung in der Südzone bleibt praktisch unverändert.

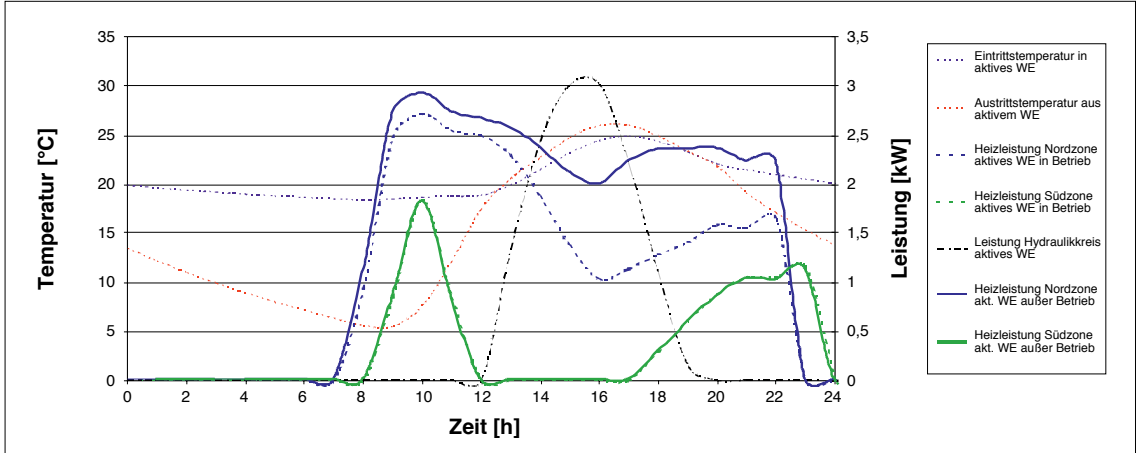


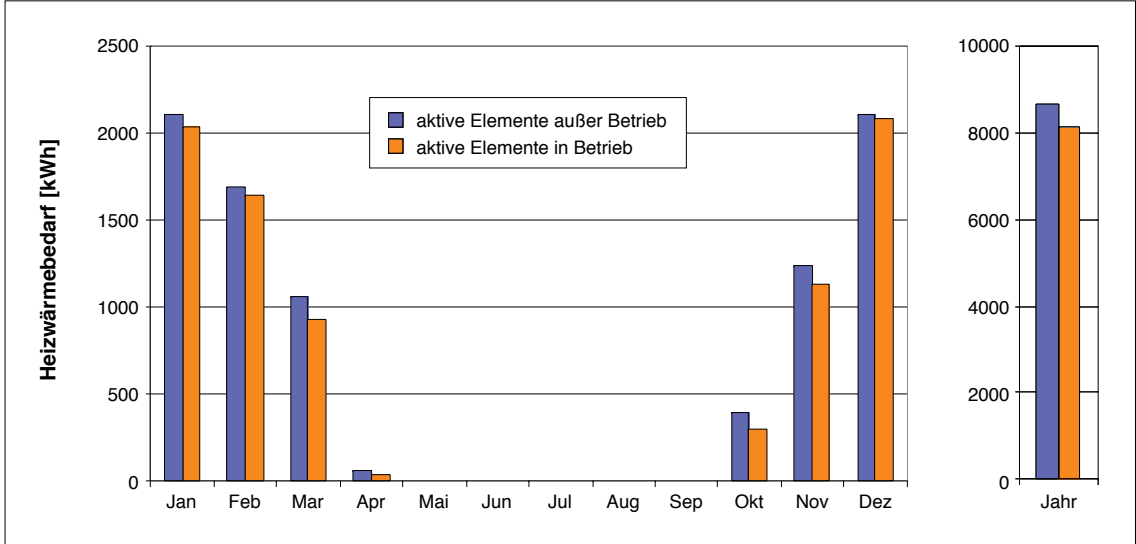
Abb. 6.29 Verlauf der Ein- und Austrittstemperatur der thermisch aktiven Wandelemente aus Holzleichtbeton in der Südfassade eines Einfamilienhauses und Vergleich der benötigten Heizleistung aus dem konventionellen Heizsystem mit und ohne Betrieb an einem 'sonnigen' Wintertag

Obwohl an einem Tag unter den genannten Randbedingungen ein erheblicher Teil des Heizwärmebedarfs durch den Holzleichtbeton-Massivabsorber solar substituiert werden kann, bleibt letztlich die energetische Leistung des Systems über das Jahr begrenzt. Diese liegt für den untersuchten Aufbau bei etwa 6 %. (Abb. 6.30)

Der beschriebene positive Effekt wird über die Heizperiode nicht wirksam (in den Monaten Dezember bis Februar 1 % bis 3 %), da einerseits solche Tage in der Summe vergleichsweise selten vorkommen, andererseits bei hohen solarem Strahlungsangebot bereits der Heizwärmebedarf durch passive solare Gewinne reduziert ist, was in gewissem Maße auch für die Nordzone zutrifft.

Angesichts des grundsätzlichen Problems bei einer solaren Heizungsunterstützung – die Gegenläufigkeit von Angebot und Bedarf –

Abb. 6.30 Vergleich des für das konventionelle Heizsystem verbleibenden Heizwärmebedarfs mit und ohne Betrieb der thermisch aktiven Fassadenelemente in monatlicher Auflösung



Holzleichtbeton  
aktives Bauteil

Potenzial-  
abschätzung

bleibt das Potenzial des Massivabsorber-Systems begrenzt. Daher wird auch die relativ hohe Volumen bezogene Wärmespeicherfähigkeit des schwereren Holzleichtbetons beim thermischen Verhalten unter den abgebildeten Randbedingungen nicht wirksam.

Auch für eine etwaige Unterstützung der Brauchwasserbereitung ist der Temperaturhub zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur nicht ausreichend ( $\approx 2$  K im Winter und  $\approx 5$  K im Sommer, vgl. Abb. 6.28+6.29). In weiterführenden Untersuchungen wäre bei einem verbesserten konstruktiven Aufbau der thermisch aktiven Bauteile indes zu prüfen, ob ein signifikanter Effekt im Bereich der Vorwärmung zu erwarten ist.

Wie beschrieben stellen die Funktionsmodelle hinsichtlich des konstruktiven Aufbaus keineswegs ein Optimum dar, so dass sich deren thermische Leistungsfähigkeit durch eine Reihe von Maßnahmen noch verbessern lassen müsste (Randlage der Verrohrung, möglichst dicht an der Absorberoberfläche, dichtere Belegung durch Einsatz von Rohrregistern etc.). Darüber hinaus können diese Effekte durch eine andere Oberflächengestaltungen (Farbe und Struktur) wie auch die Kombination des Holzleichtbetons mit Latentwärmespeicher-materialien mitunter gesteigert werden. Allerdings muss die Leistung stets mit dem höheren Aufwand an apparativer Ausstattung sowie dem Anteil an Investitions- und Betriebskosten eingehend geprüft werden. Das vorliegende Datenmaterial bildet gleichwohl eine gute Basis zu weiteren Untersuchung von Einsatzmöglichkeiten des Holzleichtbetons als Material für thermisch aktive Bauteile im Bereich der Bauteiltemperierung von Böden, Decken und Wänden.

## Anmerkungen

- 1 Vgl. Schwarz, 1987, S. 47
- 2 Vgl. Primus, 1995, S. 53
- 3 Thomas Herzog, Arbeitstreffen am Lehrstuhl, 18.11.1999
- 4 U.a. Fa. Betonbau, Ingolstadt
- 5 Zur Begriffsdefinition und Beschreibung der einzelnen Systeme. Vgl. Jastrow, 1997, S. 1
- 6 Vgl. Schwarz, 1987, S. 12ff.; BAK (Hg.), 1996, S. 65ff.
- 7  $S = c \cdot \rho$  [J/m<sup>3</sup>K]; 1 kWh = 3,6 · 10<sup>6</sup> J
- 8 Wasser und Antifrogen (als Frostschutzmittel bis -20 °C, verringert auch den Durchflusswiderstand). Tel. mit Herrn Pötzl, Fa. Betonbau, Ingolstadt, 20.09.2000. Zu den physikalischen Eigenschaften von Antifrogen und verschiedenen Solekonzentrationen. Vgl. Jastrow, 1997, S. 56
- 9 Vgl. Jastrow, 1997, S. X
- 10 Für eine Reihe von Oberflächen, z.B. Holz und Beton sind Werte der Absorptionszahl noch zu ermitteln. Vgl. Handbuch Sonnenheiztechnik, 1997, S. 3.3
- 12 Vgl. Schwarz, 1987, S. 29f.
- 13 Vgl. Schwarz, 1987, S. 36f.
- 14 Vgl. Schwarz, 1987, S. 30ff.
- 15 Außenlufttemperatur 0° C, Solarstrahlung 1 kWh/m<sup>2</sup>d, Windgeschwindigkeit 2 m/s. Vgl. Schwarz, 1987, S. 35
- 16 Vgl. Schwarz, 1987, S. 51f.
- 17 Bei sorgfältiger Verarbeitung.
- 18 Vgl. Schwarz, 1987, S. 51; Primus, 1995, S. 53f.
- 19 Vgl. Schwarz, 1987, S. 56ff.
- 20 Z.B. HDPE-Rohre; a = 125 mm,  $\phi$  = 25 mm, d = 2,3 mm. Vgl. Primus, 1995, S. 37ff., 53f.
- 21 Vgl. Schwarz, 1987, S. 66ff.
- 22 "Messungen an Betonabsorbieren im Freien ergaben mittlere Wassergehalte von ungefähr 140 kg/m<sup>3</sup>, das entspricht 6 Massen-%." Jastrow, 1997, S. 18
- 23 Vgl. Jastrow, 1997, S. 17f.
- 24 Vgl. Primus, 1995, S. 39
- 25 Ferner wurde das "Berechnungsprogramm MOMA erstellt, das den Wärmeübergang aus der Umgebung an einen Betonabsorber beliebiger Geometrie, die kurzzeitige Wärmespeicherung in demselben und den Wärmeübergang vom Beton an die Sole" beschreibt. Vgl. Jastrow, 1997, S. XI
- 26 Die Betonabsorber in der Solar-Thermie-Wohnanlage Oberhausen-Rheinhausen (Baden-Württemberg) sind in unterschiedlichen Bauweisen ausgeführt: Fassaden-/Dachelemente, Fundamentplatten, Garagen, Mauern/Winkelstützmauern, freistehende Skulpturen, sogen. Energiesterne. Vgl. Jastrow, 1997, S. 5
- 27 Vgl. Primus, 1995, S. 44f.
- 28 Vgl. Jastrow, 1997, S. 88f.
- 29 Vgl. Primus, 1995, S. 55f. Gleichwohl konnte sich das "Massiv-Absorber-Heizsystem" nicht am Bauproduktmarkt in der erhofften Weise durchsetzen, so dass die Arbeiten zu diesem solartechnischen Ansatz z.Zt. 'zurück gestellt' sind.

Vgl. Tel. mit Herrn Dr. Primus, Betonbau GmbH, Waghäusel, 17.11.2003

- 30 Vgl. Natterer, 02/1999
- 31 Vgl. Schild/Weyers, 2003, S. 151-168
- 32 Vgl. Roeder, 19.02.2001b
- 33 Von der ursprünglich vorgesehenen  $\phi$  20 mm Verrohrung wurde abgesehen, da diese in einem 1 m<sup>2</sup>-Element aufgrund zu enger Biegeradien trotz einiger Versuche nicht realisierbar war.
- 34 Verwendete Materialien:
  - Zement Portland Kalkzementstein, DIN 1164, CEM II/A-L 32,5 R, Fa. Buechl
  - Sägespangemisch der Sägerei Bayerl aus Kiefer-, Fichten- und Tannenhölzern; gemessenen, durchschnittlichen Feuchtegehalt von 8,1 % bzw. 8,3 %
  - Leitungswasser
- 35 Die Herstellung der Rezeptur III erfolgt am Freitag, den 03.11.2000 bei 18 °C und Sonnenschein; die Mischung weist erwartungsgemäß 3 Tage später bereits eine hohe Festigkeit auf; daher kann hier auf eine Nachbehandlung verzichtet werden. Rezept VI wird am Montag, den 06.11.2000 bei 10 °C und bewölktem Himmel hergestellt. Diese wird im Rahmen der Nachbehandlung mit Folie und Decken gegen Wärme- und Feuchteverlust geschützt. Vgl. Roeder, 19.02.2001b
- 36 Vgl. Hacker, 2002, S. 1-4
- 37 Vgl. Hacker, 2002, S. 5-11
- 38 Hacker, 2002, S. 5
- 39 Hacker, 2002, S. 5
- 40 Vgl. Hacker, 2002, S. 12
- 41 Hacker, 2002, S. 12
- 42 Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass mit einer TWD-Abdeckung über das Jahr, insbesondere in der Heizperiode, ein höherer Ertrag zu erwarten ist; dieser ist jedoch auch von der Anzahl der Glasscheiben im TWD-Verbund abhängig, d.h. mit höherer Scheibenanzahl verringern sich die solaren Gewinne.
- 43 Vgl. Oberdorf, 2002, S. 1f.
- 44 Vgl. Oberdorf, 2002, S. 2f.
- 45 Oberdorf, 2002, S. 2
- 46 Oberdorf, 2002, S. 3
- 47 Vgl. Oberdorf, 2002, S. 4f.



## 7 Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

### 7.1 Thermische Behaglichkeit und Heizwärmebedarf von Räumen

Betrachtet man die Faktoren die das Raumklima und den Wärmehaushalt von Gebäuden beeinflussen – und als pars pro toto den von Räumen – sind zwei wesentliche Bereiche von Bedeutung: Individuelle Aspekte im Zusammenhang mit dem Effekt der so genannten “empfundenen” Temperatur sowie baukonstruktive Aspekte im Zusammenhang mit der direkten Nutzung von Solarenergie, nämlich dem Zusammenspiel von thermischer Masse der Raum umschließenden Flächen und dem Heizwärmebedarf.

Ein als behaglich beurteiltes Arbeits- und Wohnumfeld wird von einer Reihe von Parametern bestimmt. Zunächst hängt dieses von individuellen Faktoren wie Bekleidung und Aktivitätsgrad ab. Der Mensch fühlt sich unbehaglich, wenn der Bereich der Selbstregulierung von Wärmeverlusten durch Wärmeerzeugung oder zusätzliche Wärmeabgabe des Körpers aus dem Gleichgewicht gerät. Sind die Verluste zu groß, empfindet man es als zu kalt, sind diese zu klein, als zu warm. Für die thermische Behaglichkeit besteht eine Abhängigkeit zwischen Tätigkeit und Kleidung. Wärmeverluste lassen sich durch zusätzliche Kleidung, gesteigerte Aktivität oder die Erhöhung der Raumtemperatur ausgleichen. Weitere wesentliche Einflussfaktoren sind klimatische und bauliche Parameter, wie Luft- und Oberflächentemperatur. Über die Wärmetransportmechanismen, Konvektion und Strahlung, erfolgt ein Austausch zwischen Personen und Raum. Dabei kann die von Personen “empfundene” Temperatur<sup>1</sup>, der Mittelwert aus Luft- und Oberflächentemperatur, zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit herangezogen werden.

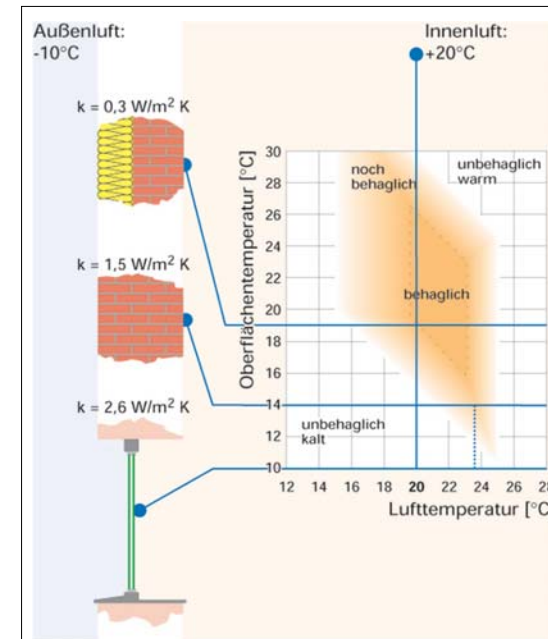


Abb. 7.1 Einfluss der raumseitigen Oberflächentemperatur und Raumlufttemperatur auf die thermische Behaglichkeit

Für diese wie auch für einen günstigen Heizwärmebedarf sollte die Temperatur Raumluft relativ niedrig und die der Umgebungsflächen relativ hoch sein, bei einer Differenz beider von maximal 3–4 K. Erhöhte raumseitige Oberflächentemperaturen können im Bereich der opaken Außenwand zum Beispiel durch wärmedämmte Aufbauten, im Bereich der Öffnungen durch den Einsatz von Wärmeschutzverglasungen erzielt werden. Eine einfache, überschlägige Betrachtung zeigt, dass an kalten Wintertagen (-10 °C) die Oberflächentemperatur bei einer mehrschichtigen Außenwand mit Außendämmung um etwa 5 K über der einer gleichdicken monolithischen Wand liegt. In diesem Zusammen-

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Thermische Behaglichkeit und Heizwärmebedarf von Räumen

Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Thermische  
Behaglichkeit und  
Heizwärmebedarf  
von Räumen

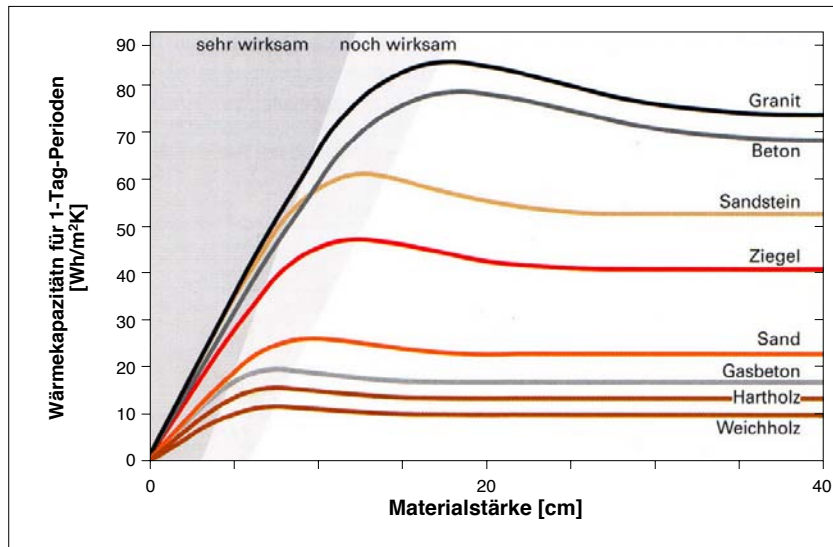


Abb. 7.2 Einfluss der Materialeigenschaften und der Einbaustärke auf die Speicherwirkung von Bauteilen

hang kann nicht von einem als behaglich einzustufenden Temperaturwert gesprochen werden, sondern handelt es sich um einen größeren Bereich, der zwischen 4 und 6 Kelvin schwankt.<sup>2</sup> (Abb. 7.1)

Am Beispiel des Zusammenwirkens von Luft- und Oberflächentemperatur wird deutlich, wie stark die Behaglichkeit auch den zusätzlichen Energieeinsatz beeinflusst. So kann die Verringerung der Lufttemperatur um 1 Kelvin den Heizwärmebedarf um etwa 4 % reduzieren. Auch resultieren aus niedrigeren Lufttemperaturen geringere Lüftungswärmeverluste. Die thermische Behaglichkeit ist zudem von der Raumluftfeuchte und der Luftgeschwindigkeit abhängig.

Energiehaushalt der Gebäude und Raumklima werden maßgeblich durch die verwendeten Baustoffe und deren bauphysikalische Ei-

genschaften, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, bestimmt. Neben der Senkung des Heizwärmebedarfs ermöglicht ein gutes Wärmespeicherverhalten von Baustoffen die Reduktion von

- Temperaturschwankungen
- sommerlicher Überhitzung

Im Rahmen einer Studie<sup>3</sup> wurden die Zusammenhänge von thermischer Masse eines Raums und Fensterflächenanteil auf den Heizwärmebedarf untersucht. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass "sommerliche[r] Komfort kein Hinderungsgrund für große Fensterflächen [ist], sobald die Masse des Raumes richtig gewählt wird." Stehen solare Gewinne und Wärmespeicherfähigkeit der Raum umschließenden Flächen in einem optimierten, ausgewogenen Verhältnis zueinander, "lassen sich Heizenergieeinsparungen von bis zu 20 % erreichen." Allerdings weisen

die Autoren daraufhin, dass bei diesen komplexen Vorgängen die Betrachtung des Speicherungsvermögens einzelner Bauteile nicht ausreicht, sondern das Verhalten des gesamten Raums besonders hinsichtlich der sommerlichen Überhitzung mit beurteilt werden muss.

Für die Speicherwirkung von Materialien sind neben den spezifischen Eigenschaften auch die Dicke der Bauteilschichten und deren Oberflächen zu berücksichtigen. In der Regel sind hierfür nur die raumseitig angeordneten, oberflächennahen Schichten von 5 bis 10 cm wirksam. "Für jedes Material steigt die Wärmekapazität zuerst mit der Bauteildicke bis zu einem Maximum an, sinkt dann leicht und wird bei großen Stärken konstant." Die Ein- und Ausspeichervorgänge erfolgen in Form von "Wärmewellen, die sich sehr langsam bewegen und deshalb im Verlauf eines Tages nur 10 bis 30 cm je nach Material in die Tiefe eindringen."<sup>4</sup>

Ein Vergleich der Wärmeaufnahme<sup>5</sup> von gängigen Baustoffen zeigt dabei große Abweichungen. Diese sind weitgehend auf deren unterschiedliche spezifische Wärmekapazität zurückzuführen; Materialien mit großer thermischer Masse weisen die größte Speicherwirkung auf. (Abb. 7.2)

Man kann jedoch nicht von der thermischen Masse der Raum umschließenden Flächen direkt auf die Raumlufttemperatur schließen. Einspeicher- und vor allem Ausspeichervorgänge stellen sehr komplexe physikalische Abläufe dar. Computergestützte Simulationsberechnungen haben gezeigt, dass massive Konstruktionen mit effektiv hohen Speichermassen auf den sommerlichen Überhitzungsschutz sowie – in geringerem Maße – den Heizwärmebedarf positiv einwirken. Darüber hinaus kann im Winter der Nutzungsanteil solarer Gewinne erhöht werden.<sup>6</sup>

Mit einem höheren Konstruktionsgewicht und damit größerer Wärmespeicherfähigkeit der Raum umschließenden Flächen nimmt der "Gestaltungsspielraum" hinsichtlich des Öffnungsanteils in (Süd-)Fassaden bei gutem bis sehr gutem sommerlichen Überhitzungsschutz, effizienter (luftgeführter, passiver) Kühlung sowie geringem bis sehr geringen Heizwärmebedarf zu.<sup>7</sup>

Das Ziel einer Anhebung der thermischen Masse kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen, zum Beispiel durch den Einsatz von Baustoffen mit hoher Wärmespeicherkapazität in der Primärkonstruktion beziehungsweise nachträglich im Innenausbau (Estriche, abgehängte Deckenelemente). Die Nutzung von Wärmespeichereffekten ohne einen Phasenübergang mit sensibler (fühlbarer) Wärme, erfordert jedoch aufgrund der meist niedrigeren Energiedichte der Baustoffe und damit geringeren Wirksamkeit ein höheres spezifisches Gewicht oder größeren Flächenbedarf.<sup>8</sup>

Insbesondere bei Leichtbauten, bestehen aufgrund fehlender Speichermassen Probleme mit der Überhitzung und mit der Auskühlung. Diese Lastunterschiede können zu starken Beeinträchtigungen des Komforts führen und – aufgrund der zur Kompensation zusätzlich aufgewendete Kühlung oder Heizung – zu erhöhtem Energieverbrauch.

Die Aufgabe, überschüssige Wärme zwischenzuspeichern und zu einem späteren Zeitpunkt an dem Raum wieder abzugeben, erfordert Materialien mit hohen Speicherenergiedichten. In diesem Zusammenhang stellen Latentwärmespeichermaterialien (PCM), die in einem Temperaturbereich große Wärmemengen speichern können, äußerst viel versprechende neue Baustoffe dar.

## 7.2 Holzleichtbeton und PCM

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Versuchsarbeiten zeigen, dass Holzleichtbeton als Material für passiv und aktiv wirksame Bauteile vielfältige positive Materialeigenschaften aufweist. Daher erscheint es sinnvoll, angesichts der aktuellen Forschungen im Bereich der Latentwärmespeichertechnologie, dieses Kompositmaterial auch im Verbund mit PCM zu untersuchen.

Gerade in der Betrachtung solcher Kombinationsmöglichkeiten lässt sich ein interessantes Entwicklungspotenzial hinsichtlich zusätzlicher und neuer Optionen der Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton erkennen. Die Verbindung verspricht eine Reihe funktionaler und baukonstruktiver Vorteile, das heißt leichtere und dünnere Wandelemente bei gleichzeitig verbesserten thermodynamischen Stoffeigenschaften.

Während bereits eine Reihe von Verfahren zum Einmischen von PCM in anorganische Baustoffe bestehen, stellen die Untersuchungen der Kombination von organischen Latentwärmespeichermaterialien (Abb. 7.3) mit hydraulischen Bindemitteln (Zement) und organischen Zuschlagsstoffen (Holz) ein neues Forschungsfeld dar.

Dieser Ansatz verspricht Kosteneinsparungen sowie Erleichterung beim Bauablauf, da zusätzliche Integrationsmaßnahmen entfallen. Darüber hinaus kann Holzleichtbeton in den Bauteiloberflächen sichtbar und damit auch das PCM-Material gestalterisch wirksam eingesetzt werden.

Ziel der Arbeiten ist eine vorbereitende Untersuchung zur Klärung materialspezifischer Grundlagen zu Einsatzmöglichkeiten von



Abb. 7.3 Latentwärmeparaffin RT

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien im Bereich von Gebäudefassaden.

Die Arbeiten umfassen zunächst:

- Auswahl geeigneter Holzleichtbeton-Rezepturen (Rohdichte, Zement-, Wasser-, Holz-Anteil/Korngrößen) für die Materialkombination, das heißt die Klärung der Verträglichkeit des PCM mit Zement, Holzreststoffen und Wasser
- Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Tests von verschiedenen Mischungen hinsichtlich materialspezifischer Kennwerte und bauphysikalischer Aspekte
- Potenzialabschätzung ausgewählter Wandaufbauten hinsichtlich des thermischen Verhaltens

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Holzleichtbeton und PCM

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Latentwärmespeichermaterialien

### 7.3 Latentwärmespeichermaterialien

Der Ansatz die Latentwärme von Stoffen zu nutzen, um Wärme und Kälte einzuspeichern, ist nicht neu. Bis in die römische Antike lässt sich das Schmelzen von Eis zum Kühlen von Lebensmitteln zurückverfolgen. Versuche der Wärmespeicherung mit solchen Materialien beginnen um das Jahr 1940 in den USA.<sup>9</sup> Verstärkt werden Latentwärmespeichermaterialien Anfang der 1970er Jahre in der Weltraumfahrt, zum Schutz der Astronauten vor extremen Temperaturschwankungen und zur Ummantelung der temperaturempfindlichen Instrumente eingesetzt. Mittlerweile besteht ein breites Einsatzspektrum von der Fahrzeug- und Verfahrenstechnik sowie Elektronik, Energie- und Medizintechnik bis zu Catering-Anwendungen. Seit einigen Jahren werden PCM auch für Spezialtextilien, 'Outdoor'-Kleidung wie Anoraks, Handschuhe etc. als Wärme- sowie Kälteschutz eingesetzt und dienen als Schuheinlagen, um Wärme zwischenzupuffern. Ferner findet man Latentwärmespeichermaterialien in Schutzanzügen vor extrem hohen Temperaturen oder in den unterschiedlichsten Ausformungen von Transportbehältern, zum Beispiel zur Kühlung von Blutkonserven oder zum Warmhalten von Lebensmitteln. Heute sind (am Markt beziehungsweise im Labor) weit über 100 verschiedene PCM bekannt.

#### 7.3.1 Latente Wärme-/Kältespeicherung

Klassische Wärmespeichermaterialien können nur die sensible Wärme speichern. Bei den im Baubereich relativ geringen Temperaturdifferenzen erfordern diese Materialien zur Wärmeaufnahme große Volumina. Dem gegenüber können Latentwärmespeichermaterialien neben der sensiblen auch die latente

(versteckte) Wärme nutzen, die beim Aufschmelzen eines Stoffes zugeführt und beim Erstarren wieder freigesetzt wird. Aufgrund der latenten Wärme des Phasenübergangs, dem Wechsel von einem physikalischen Zustand (fest) in einen anderen (flüssig) durch Schmelzen beziehungsweise Erstarren sind diese Materialien in der Lage, große Wärmemengen bei vergleichsweise niedrigem Temperaturhub zu speichern und wieder abzugeben. Dabei erfolgt der Ladebeziehungsweise Entladevorgang unabhängig vom Ladezustand des Speichers. (Abb. 7.4)

Den bekanntesten Phasenübergang stellt das Schmelzen beziehungsweise Erstarren von Eis dar. Die latente Wärme dieses Übergangs entspricht etwa der sensiblen Wärme, die erforderlich ist um Wasser von 0 auf 80 °C zu erhitzen. Dies verdeutlicht im Vergleich zur fühlbaren Wärme die sehr hohe Energiedichte in einem schmalen Temperaturbereich. Die Leistungsfähigkeit von Latentwärmespeichermaterialien veranschaulicht auch der Vergleich von Wärmeaufnahmevermögen und Bauteildicke: Eine 1 cm PCM-Schicht hat in etwa dieselbe Speicherkapazität wie 12 cm Beton oder 18 cm Massivholz.<sup>10</sup> (Abb. 7.5)

Für die Wärme- und Kältespeicherung steht eine Reihe von PCM-Materialarten am Markt zur Verfügung. Man unterscheidet:

- organische (Paraffine) und
- anorganische Stoffe (Salze, zum Beispiel Natrium-Acetat<sup>11</sup>, Natriumsulfat-Decahydrat, das heißt Glaubersalz)

Diese besitzen unterschiedliche Schmelztemperaturbereiche und Massebeziehungsweise Volumen bezogene Energiedichten:

(Abb. 7.6)

- Salz-Wasser-Eutektika (> 0 °C)
- Gashydrate (0 °C bis 20 °C)
- Salzhydrate (5 °C bis 130 °C)

- Paraffine (< 0 °C bis 130 °C)
- Zuckeralkohole (90 °C bis 180 °C)

Neben dem Phasenübergang fest-flüssig sind auch Latentwärmespeichermaterialien mit fest-fest Phasenübergängen bekannt, die sich jedoch aufgrund von technischen Problemen noch im Versuchsstadium befinden.<sup>12</sup>

Aufgrund des Phasenwechselverhaltens erfordern PCM-Materialien ein Behältnis für den funktionalen und konstruktiven Einsatz. Die "Konfektionierung" kann in verschiedener Weise und mit unterschiedlichen Materialien erfolgen, durch:

- Makroverkapselung
- Mikroverkapselung
- Verbundmaterialien

Bei einer Verkapselung wird das Speichermaterial von einer Kapselhülle, überwiegend auf Kunststoffbasis (Polypropylen, Polyethylen, PMMA), zum Teil auch aus Metall, geschlossen umhüllt. Demgegenüber fügt man beim Verbund einem Trägermaterial das PCM hinzu, das 'offen' in dessen innerer Struktur eingebettet ist.

Die Makroverkapselung kann in Form von plattenförmigen Containern, Kugeln oder Matten mit tiefgezogenen Hohlräumen erfolgen. Mittlerweile werden PCM auch in Beuteln aus metallisch beschichteter Spezialfolie konfektioniert. Bei makroverkapselten PCM wirkt sich der schlechte Wärmetransport, insbesondere bei der Speicherentladung, nachteilig aus. Dagegen haben Mikrokapseln wegen der geringen Größe (3 bis 20 µm) eine gute Wärmeübertragung, eine große Austausch-Oberfläche, lassen sich gut dosieren und einfach wie ein weiterer Zuschlagsstoff verarbeiten.<sup>13</sup>

Für die Einbringung in Verbundmaterialien bestehen ebenfalls zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze, einerseits die Befüllung beziehungsweise Tränkung von (mikro-)porö-

sen, plattenförmigen Trägermaterialien, wie Holzfaserplatten oder Grafitschaum; andererseits erfolgt die Einbringung in Granulatform, wobei in diesem Fall das PCM zwar 'vollständig' umhüllt, jedoch nicht hermetisch eingeschlossen ist.<sup>14</sup>

### 7.3.2 PCM in Gebäuden <sup>15</sup>

Die Möglichkeit mit Latentwärmespeichermaterialien Wärme und Kälte zu speichern, und damit Energie zu sparen, lenkt früh den Blick auf den Bausektor. Allerdings bestehen bei Gebäude bezogenen Anwendungen Einschränkungen hinsichtlich des Schmelztemperaturbereichs. Für einen effizienten Einsatz von PCM ist eine auf den Anwendungsbebereich abgestimmte Phasenübergangstemperatur wichtig.

Typische Speichertemperaturen liegen zwischen 0 und 40 °C, bei haustechnischen Anlagen wie Fußbodenheizungen können diese über 50 bis 60 °C betragen. Soll das PCM raumseitig zum sommerlichen Überhitzungsschutz und zur Pufferung von Temperaturspitzen oder zur Speicherung von niedrigen Temperaturen, zum Beispiel für die Pufferung kühler Nachtluft dienen, sind 22 bis 25 °C anzustreben. Doch gerade in diesem Bereich stehen nur wenig Praxis erprobte Materialien zur Verfügung.

Erstmals finden um 1940 in den USA Versuche mit PCM statt, um solar erzeugte Wärme zur Beheizung eines Wohnhauses (zwischen) zu speichern. Weiterentwicklungen mit makroverkapselten Paraffinen (tischtennis- beziehungsweise tennisballgroße Kapseln) in den 1970er Jahren zeigen sich indes eine Reihe von den bereits genannten Nachteilen, vor allem beim Entladen. Zusätzlich schränken die Makrokapseln in Bauteilen wie Raumwänden die Benutzbarkeit ein, da durch Nageln oder Bohren die Gefahr einer Zerstörung der Kapseln besteht, mit der Folge, dass

PCM austritt. Aufgrund dieser Probleme bleiben zunächst breitere Forschungsaktivitäten aus.

Ab Mitte der 80er Jahre arbeitet man bereits mit mikroverkapselten PCM und mischt diese als Zuschlagsstoff in gängige Baustoffe. Trotz zahlreicher Patentanmeldungen können sich diese Ansätze ebenfalls (noch) nicht am Markt durchsetzen.

Über diese Anwendungen in opaken Wand- und Deckenaufbauten hinaus, werden Latentwärmespeichermaterialien, vergleichbar einer TWD, auch als Direktgewinn-Systeme eingesetzt. Ein konzeptioneller Ansatz führt bereits in den 1970er Jahren zur Befüllung von Glasbausteinen mit Glaubersalz.<sup>16</sup> Bei einem aktuellen Bauvorhaben wird eine neu entwickelte lichtdurchlässige Solarwand im Bereich der Südfassade erstmals eingesetzt, bei der das Paraffin in eingefärbten transparenten Kunststoff-Behältern eingefüllt ist.<sup>17</sup> Neben der hohen Wärmespeicherfähigkeit ermöglichen solche Systeme noch eine natürliche Belichtung und partiell eine Sichtverbindung nach außen.

Ein großer Schub in der Entwicklung und Erprobung von PCM erfolgt in den 90er Jahren. Möglich wird dies vor allem durch verbesserte

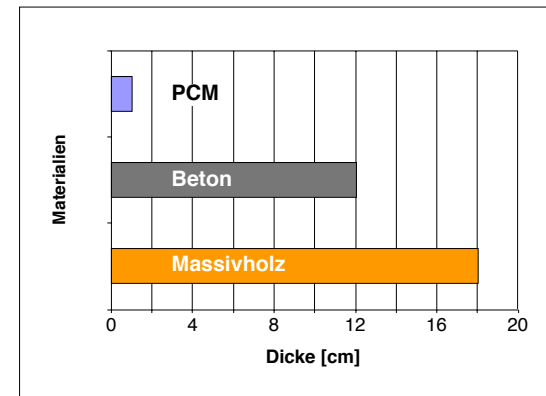
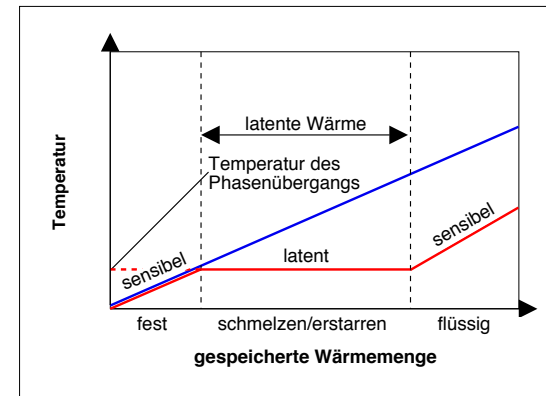
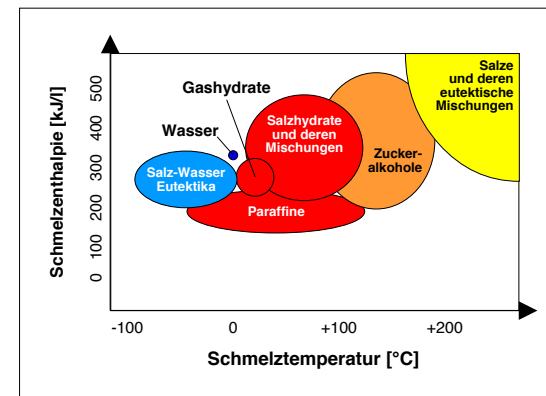


Abb. 7.4 Temperaturverlauf beim Phasenwechsel fest / flüssig (Vgl. Mehling, 2002, S. 2)

Abb. 7.5 Notwendige Schichtdicke unterschiedlicher Materialien zur Speicherung gleicher Wärmemenge (Vgl. DELTA-PCM, (12)/2003, o.S.)

Abb. 7.6 Latentwärmespeichermaterialien mit typischen Volumen spezifischen Schmelzenthalpien und Temperaturbereichen (Vgl. Mehling, 2002, S. 2)



Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Latentwärmespeichermaterialien

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Latentwärme  
speichermaterialien

	Paraffine
Schmelztemperatur [°C]	-30 ... 110 *
Spezifische Schmelzenthalpie ( $\Delta H_s$ ) [kJ/kg]	160 ... 230
Spezifische Wärmekapazität ( $c_p$ ) [kJ/kgK]	2,50
Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) [W/mK]	0,20
Dichte fest ( $\rho$ fest) [kg/m <sup>3</sup> ]	800 ... 900
Dichte flüssig ( $\rho$ flüssig) [kg/m <sup>3</sup> ]	750 ... 850
Volumenänderung geb./ungeb. ( $\Delta V$ ) [ $\Delta T=100$ °C]	0 % / 10 %
Zündtemperatur ( $t_{z\u00fcnd}$ ) [°C]	> 250
pH-Wert	7 (neutral)
Wassergef\u00e4hrdungsklasse	0

Abb. 7.7 Stoffdaten von (W\u00e4rme-)Paraffinen. \* Abh\u00e4ngig vom Paraffintyp

technische Eigenschaften der PCM. Allerdings betreffen diese Fortschritte zun\u00e4chst nicht den Bausektor.

Der breite Einsatz in Bauprodukten ist, trotz gro\u00dfer Entwicklungsfortschritte, auch heute noch eingeschr\u00e4nkt. Zum einen fehlen (stabile) Stoffe im Bereich niedriger Schmelztemperaturen, vor allem Salze; zum anderen bestehen eine Vielzahl technischer Probleme, wie inkongruentes Schmelzverhalten oder Entmischung der Substanzen beim Schmelzen.

Gleichwohl sind partiell Durchbr\u00fcche zur Produktentwicklung zu verzeichnen. Vielerorts wird intensiv an unterschiedlichen Konfektionen und Kombinationen geforscht, werden zunehmend wieder Patente angemeldet und (Vorstudien f\u00fcr) Bauprodukte, verst\u00e4rkt auch f\u00fcr den Einsatz im Geb\u00e4udebestand, vorgestellt.<sup>18</sup>

### 7.3.3 Paraffine<sup>19</sup>

Im Folgenden werden ausschlie\u00dflich Paraffine behandelt, da einerseits das Geb\u00e4udebezogene Spektrum dieser PCM (zum Zeitpunkt der experimentellen Arbeiten) sich gr\u00f6\u00dfer und viel versprechender gestaltet; andererseits stehen diese Materialien im Gegensatz zu anderen f\u00fcr die Versuche zur Verf\u00fcgung. Paraffine sind organische Stoffe, die aus Erd\u00f6l gewonnen werden und chemisch zur Gruppe der ges\u00e4ttigten Kohlenwasserstoffe ( $C_nH_{2n+2}$ ) z\u00e4hlen. F\u00fcr w\u00e4rmetechnische Anwendungen werden vornehmlich so genannte Normal-Paraffine, die aus unverzweigten Kohlenwasserstoffketten bestehen, eingesetzt. Die H\u00f6he der Schmelztemperatur steigt mit der Kettenl\u00e4nge, das hei\u00dft der Anzahl der Kohlenstoffatome im Molek\u00fcl. F\u00fcr eine effiziente W\u00e4rmespeicherung weisen Paraffine eine Reihe g\u00fcnstiger Materialeigenschaften auf: (Abb. 7.3, 7.7)

- Sehr hohe spezifische Schmelzenthalpie (f\u00fcr organische Stoffe), bis zu 230 kJ/kg
- Sehr hohe Speicherenergiedichte von etwa 54 kWh/m<sup>3</sup>
- Thermische Stabilit\u00e4t bis etwa 250 °C; selbst bei hohen Betriebstemperaturen kommt es zu keinem nennenswerten Dampfdruck
- Paraffine sind inert, das hei\u00dft gehen kaum Reaktionen mit anderen Stoffen ein (geringe/keine Korrosion)
- Gelten als alterungsbest\u00e4ndig und absolut zyklenstabil
- Sind toxikologisch unbedenklich, daher sowohl in der Lebensmittel- als auch der Kosmetikindustrie eingesetzt
- hohe Verf\u00fcgbarkeit

Als W\u00e4rmespeichermaterial werden bevorzugt ungebundene Paraffine eingesetzt, da in diesem Fall die Speicherenergiedichten besonders hoch sind. Um hohe Ein- und Aus-speicherleistungen zu realisieren, muss durch ein geeignetes Verfahren beziehungsweise einen g\u00fcnstigen Aufbau f\u00fcr gro\u00dfe W\u00e4rme\u00fcbertragungsfl\u00e4chen gesorgt werden. Allerdings ist der Einsatz ungebundener Paraffine besonders im Baubereich nur eingeschr\u00e4nkt m\u00f6glich.

Gebundene Paraffine werden dagegen in ein Matrixmaterial (zum Beispiel Tonerde), eingebettet, das eine homogene Verteilung erm\u00f6glicht. Bei Temperaturanstieg verfl\u00fcssigen sich die Paraffine in den Mikrokapseln und entziehen dabei der Umgebung W\u00e4rme. Bei Temperaturabfall wird diese eingelagerte W\u00e4rme langsam wieder abgegeben, ohne dass das Matrixmaterial durch den Wechsel des Aggregatzustandes ver\u00e4ndert wird.

Obwohl Paraffine entz\u00fcndbar sind, lassen sich diese \u00e4u\u00dferst sicher einkapseln, so dass auch bei hohen Temperaturen eine Feuerbest\u00e4ndigkeit gew\u00e4hrleistet ist. Gekapselte Pa-

raffine behalten ebenso während des Phasenwechsels ihre Form. Auftretende Ausdehnungen werden durch das Matrixmaterial aufgenommen. Selbst bei hohen Betriebstemperaturen tritt kein flüssiges Material aus der Stützmatrix aus.

Weitere Vorteile gebundener Paraffine sind:

- Hervorragende thermodynamische Stoffeigenschaften, wie hohe Speicherkapazität und keine Unterkühlungseffekte
- Verzögerungsarmes Ein- und Ausspeichern der Wärme
- Einfache Handhabung
- Große Variabilität in Form und Konsistenz: Verarbeitung in Platten, als Granulat, Pulver und Paste
- Ökologische und technische Unbedenklichkeit
- Hohe Lebensdauer und 100 % Recyclebarkeit

Durch diese positiven Eigenschaften eignen sich Paraffine besonders, um im Leichtbau kompakte Bauteile mit großen Wärmespeicherkapazitäten zu realisieren. Solche Verbundmaterialien sind in Form und Einsatztemperatur gut anzupassen und können für unterschiedliche Anwendungszwecke dienen.

### 7.3.4 Anwendungsmöglichkeiten

Beim Einsatz von Latentwärmespeichermaterialien lassen sich zunächst technische und nicht technische Anwendungen unterscheiden. In einer weiteren Betrachtungsebene stellen unter den technischen Anwendungen neben Apparate- und Fahrzeugtechnik die Gebäude bezogenen Einsatzmöglichkeiten ein großes Potenzial dar. (Abb. 7.8)

Bei der Gebäudetechnik besteht eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten als Wärme- und Kältespeicher. Ein Einsatzgebiet stellen Luftheizungssysteme dar.

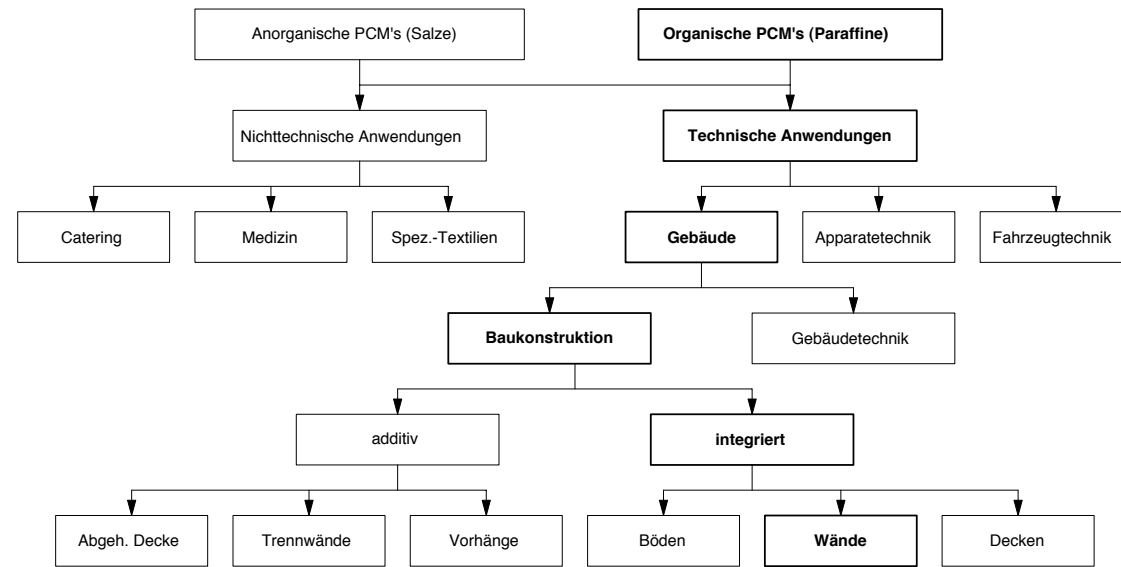


Abb. 7.8 Übersicht und Klassifizierung von Latentwärmespeichermaterialien und ihrer Anwendungen (12/2003). Unterlegt ist der Betrachtungsschwerpunkt der Versuchsarbeiten

Das Speichermaterial, Granulat oder Platten, ermöglicht frei wählbare Speichergeometrien und gewährleistet große Wärmeübertragungsflächen sowie geringe Druckverluste. Latentwärmespeicher erreichen gegenüber Mineralspeichern auf Basis von Sand, Kies oder Steinen bei gleichem Volumen eine 3- bis 5-fach höhere Speicherkapazität. Daraus resultieren zum einen geringere Speichergewichte, zum anderen reduziert sich der Platzbedarf wodurch die Flächenkosten gesenkt werden können.

Paraffine lassen sich ebenso in der Kältetechnik zur Steigerung des 'Kältehaltevermögens' einsetzen. Neben einem gleichmäßigen Betrieb der Anlage (Kühlhauswände, Kühltruhen) und dem Abbau von Lastspitzen, ermöglichen die PCM einen kleineren Anlagenbau.

Für den Bereich der Baukonstruktion sind prinzipiell zwei Möglichkeiten zu unterscheiden:

- addiert: das PCM-Material wird in Elementen wie abgehängte Decken, Trennwände, Manipulatoren etc. eingesetzt
- integriert: die Paraffine beziehungsweise das Speichergranulat sind in Elemente der Primärkonstruktion, also Böden, Wände, Decken eingebunden

#### Additiver Einsatz

Durch den Einsatz von (dünnwandigen) Speicherelementen, zum Beispiel bei abgehängte Decken, kann die Speicherkapazität der Raumschließungsflächen deutlich erhöht werden, so dass Lastspitzen zwischengepuffert und die eingelagerte Wärme zeitversetzt an den Raum wieder abgegeben werden kann.

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Latentwärmespeichermaterialien

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Herstellung erster Funktionsmodelle

Dies führt gleichermaßen zu einer spürbaren Verbesserung der Behaglichkeitssituation und einem reduziertem Energiebedarf.

Weitere Einsatzmöglichkeiten sind unter anderem Manipulatoren<sup>20</sup>: die Einbindung in Sonnenschutzsysteme (Jalousien) oder die Beschichtung von Vorhängen. So kann zwischen zwei Stoffen eine drei Millimeter dünne Schicht aus Polyurethanschaum mit gekapselten Paraffinen eingebettet sein. Auch wenn die Wärme- und Kältespeicherkapazität solcher Systeme aufgrund der dünnen Schicht begrenzt ist, kann zum Beispiel der Wärmeschutz von Glasfassaden verbessert werden.<sup>21</sup>

#### Integrierter Einsatz

Die Verwendung von Latentwärmespeichermaterialien in Fußbodenheizungs-Systemen gewährleistet eine größere Temperaturkonstanz im Bodenaufbau, das heißt Temperaturspitzen im Bereich des Heizregisters beziehungsweise der Bodenoberfläche werden besser abgepuffert. Durch die hohe Wärmespeicherkapazität (dünn-schichtiger) Speicherelemente kann die Schichtstärke des Bodenaufbaus bis zu 50 % einer konventionellen Estrichlösung reduziert werden. Diese Speichermaterialien eignen sich durch das geringe Eigengewicht besonders für die Altbaumodernisierung. Als weiterer Vorteil gilt der Wegfall der für Estriche üblichen Trocknungszeiten (6 bis 8 Wochen).

Zu dem Bereich der integrierten Anwendungen sind ferner die Verfahren zum Einmischen beziehungsweise Tränken von Latentwärmespeichermaterialien in anorganische beziehungsweise organische Baustoffe zuzuordnen, die im Bereich der Primärkonstruktion oder des Innenausbaus eingesetzt werden können.

## 7.4 Herstellung erster Funktionsmodelle

### 7.4.1 Bau von Schalungen

Für die Herstellung unterschiedlicher Musterplatten werden zunächst drei Schalungskörper gebaut. Diese sollen einerseits für mehrere Betonierungsgänge genutzt werden, andererseits die Herstellung unterschiedlicher Plattenformate ermöglichen. Ferner besteht die Anforderung an eine gute Handhabbarkeit bezüglich der Abmessungen wie des Gewichts.<sup>22</sup> Darüber hinaus sollen die Abschaler und der 'Wechselrahmen' einfach, ohne zusätzliche Verbindungsmittel zusammenzubauen sein.

Für den Einsatz von Schaltafeln sind die angestrebte Betonoberfläche sowie die Einsatzhäufigkeit wesentliche Parameter. Mit den geplanten Versuchsreihen bewegt man sich in sehr überschaubaren Verwendungszyklen, hinsichtlich der Oberflächen sollen aber verschiedene Optionen möglich sein. Als Material für Grundplatte und Abschaler werden WESTAG-Schalungsplatten (WESTAPLEX) verwendet, mit denen matte Betonoberflächen erzielt werden können. Diese 11-fach Furniersperrholzplatte mit einer Filmbeschichtung von 120 g/m<sup>2</sup>, gilt je nach Beschichtungsart für bis zu 100 Einsätze als geeignet.

Für die quadratischen Funktionsmodelle wird als Abmessung eine Kantenlänge von 600 mm gewählt sowie für kleinere Muster durch einfache Unterteilung 290 mm. Auf einer Grundplatte von 760 x 760 x 21 mm werden Mehrschicht-Leisten (50 x 30 mm) als Anschlag für die Abschaler fest mit der Grundplatte verschraubt. Als 'Gegenhalter' dienen auswechselbare Schalungsplatten mit einer Dicke von 21 mm.

Zwischen Anschlagleiste und Schalungsplatte werden die vier Abschaler (Länge 760 mm beziehungsweise 600 mm) auf der Grundplatte eingeschoben. Als Gesamthöhe sind 80 mm gewählt, um bei etwa 60 mm starken Funktionsmodellen noch ausreichend Spielraum für die Arbeit mit Strukturschalungen vorzuhalten.

Dieser Aufbau führt nicht nur zu einer sehr einfachen Handhabung, sondern erleichtert auch die Reinigung der einzelnen Elemente. Um eine ausreichende Dichtigkeit während des Einfüllens des Frischbetons sicher zu stellen, sind die Abschaler noch mit Schraubzwingen fest zu verankern. (Abb. 7.9–7.11)

Diese elementierte Form des Schalungsbaus ermöglicht zusätzlich auch die Arbeit mit unterschiedlichen Oberflächentexturen beziehungsweise -strukturen. Neben der mattglatten WESTAPLEX-Platte wird eine verschleißfeste Holzkunststoff-Verbundplatte – eine 21 mm dicke Stabsperrholzplatte auf der einen Seite mit glattem Deckfurnier, auf der Rückseite ein Furnier mit "markanter" Brettstruktur (STRUKTOPLAN special 21) – verwendet. Als dritte Variante dient eine ebenfalls 21 mm dicke OSB/3<sup>23</sup> Bau- und Verlegeplatte. Die in der Regel parallel verlaufenden Längsspäne haben sehr unterschiedliche Dimensionen und sind im Mittel etwa 100 mm lang und 30 mm breit. Dadurch ergibt sich eine lebhaft strukturierte Deckschicht, die auch zu interessanten Sichtbeton-Oberflächen führen kann. Ein 'Kreuz' aus ineinander gesteckten Furniersperrholzplatten (Höhe 60 mm), das auf die Wechselplatten gelegt und durch eine sorgfältige Einfüllung der Betonage positioniert wird, vervollständigt das Repertoire an Schalungselementen.<sup>24</sup>



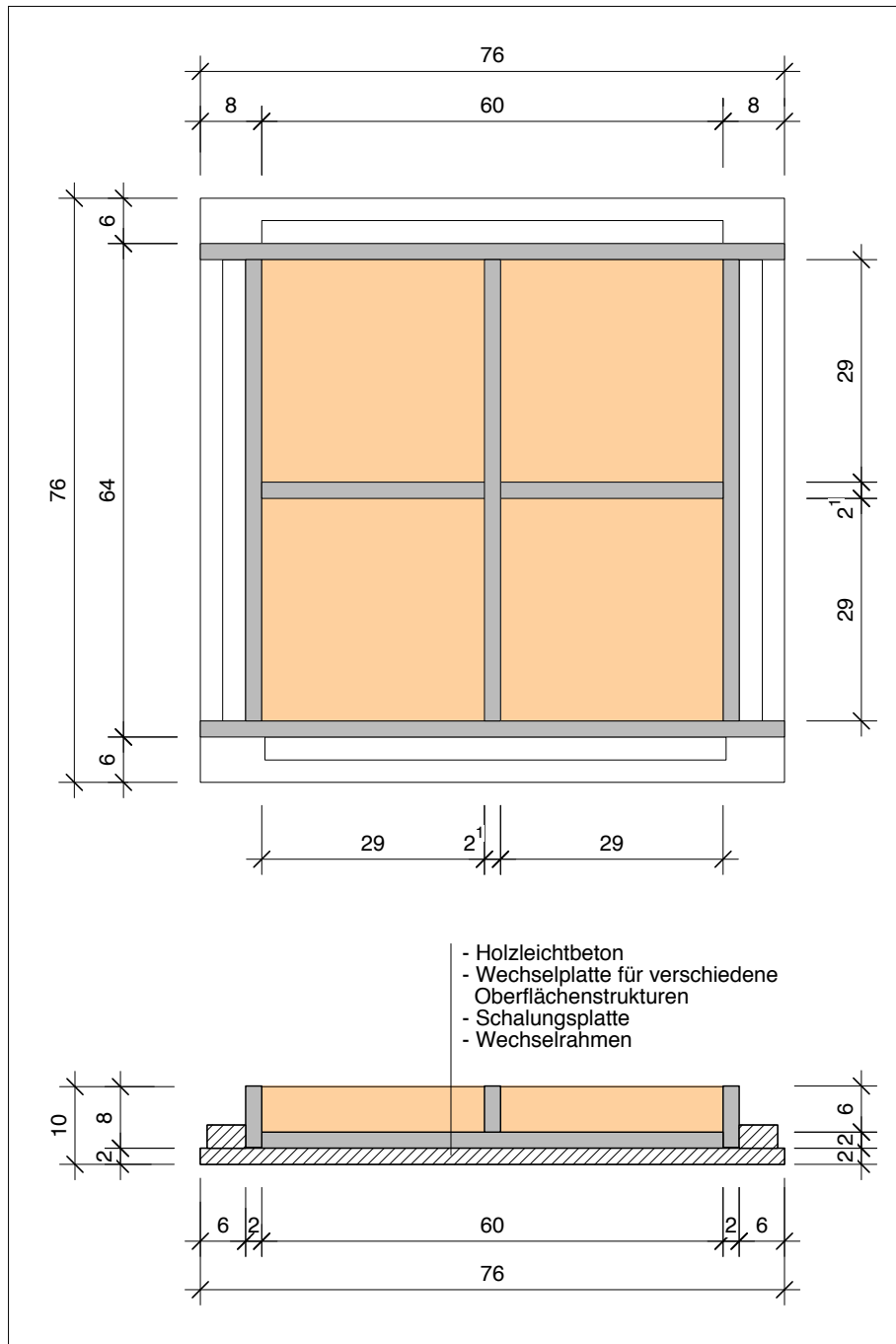


Abb. 7.9 Zeichnungen der Schalungsformen



Abb. 7.10 Schalung mit Grundplatte, Wechselboden und seitlichen Abschalern

Abb. 7.11 Zusammenbau einer Schalung



Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Herstellung erster  
Funktionsmodelle

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Herstellung erster  
Funktionsmodelle



#### 7.4.2 Vorarbeiten und Ausgangsstoffe

Für die Identifizierung geeigneter Materialkombinationen muss vorab die Verarbeitungsweise geklärt werden. Anknüpfend an die Versuche an der EPF Lausanne/I-Bois sowie bei der IEZ Natterer GmbH in Saulburg/Wiesenfelden wird für die Herstellung der Funktionsmodelle eine Trockenmischung gewählt. Zunächst werden die Holz- und Zementzuschläge gemischt, anschließend das PCM-Material zugegeben, bevor man zum Schluss das Zugabewasser dosiert, bis der Frischbeton die erwünschte Konsistenz erreicht.

Trockenmischungen bewähren sich zu einem bei der Verarbeitung von Speichergranulaten,<sup>25</sup> zum anderen haben solche Mischungen den zusätzlichen Vorteil, für eine spätere Baustellenverarbeitung portioniert und in Säcken abgepackt geliefert werden zu können. Eine Vorbehandlung der Holzspäne erscheint nach den bisherigen Erfahrungen nicht zwingend erforderlich.<sup>26</sup>

Besondere Einflüsse hinsichtlich der Auswirkung einer 'feuchten' Vorbehandlung des Restholzes auf die Mischfolge sollen gegebenenfalls in späteren Testreihen untersucht werden.<sup>27</sup>

Die in der Holz verarbeitenden Industrie anfallenden Sägespäne setzen sich in der Regel aus einer Mischung verschiedener Nadelhölzer zusammen, wobei die prozentuale Zu-

Abb. 7.12 Baumstämme werden aus dem Wald zur Bearbeitung angeliefert ...

Abb. 7.13 ... und nach der Bearbeitung die Späne vorsortiert auf Halden gelagert

Abb. 7.14 Für die Versuchsarbeiten verwendetes Restsägeholz, abgeseibt 4 mm

sammensetzung für die Auswahl als Zuschlagsstoff für Holzleichtbeton letztlich eine untergeordnete Rolle spielt. Bei der Auswahl für die Versuche wird jedoch darauf geachtet, das Restholzsortiment möglichst von einem Unternehmen zu beziehen. So lassen sich die Einflussparameter (insbesondere die Kornform durch die verwendeten Bearbeitungsmaschinen, aber auch die Holzfeuchte) gut angleichen um weitgehend einheitliche Versuchsbedingungen zu erhalten.<sup>28</sup>

Für die experimentellen Arbeiten konnte die Unterstützung einer Firma gewonnen werden, die im großen Maßstab das Restholz vorsortiert und in großen Halden im Freien lagert. Das verwendete Holzgranulat setzt sich zu 99,9 % aus Fichtenholz zusammen. Die Späne werden vom Lagerplatz in schweren Lastkraftwagen zur Verarbeitung von Spanplatten (95 %) oder als Beimengungen zur industriellen Ziegelherstellung verwendet (5 %).<sup>29</sup> (Abb. 7.12+7.13)

Bei der Vorauswahl der Korngröße wird eine Obergrenze der Sieblinie mit  $\leq 10$  mm festgelegt, da sich Versuche an der EPF Lausanne/I-Bois mit größeren Spänen<sup>30</sup> nicht bewährt hatten. Das Restsägeholz stand in vier Fraktionen für die Versuche zur Verfügung: Sägemehl, ungesiebt<sup>31</sup> sowie Granulat, abgeseibt in den Stufen 4 mm, (Abb. 7.14) 3 mm, 2 mm.

Ein Problem bei Mischungen mit ('niedrig schmelzenden') PCM auf paraffinischer Basis können die durch die Hydratation des Zements auftretenden Temperaturen darstellen. Bei den 60 mm dicken, plattenförmigen Bauteilen wird davon ausgegangen, dass ein ausreichender Wärmeabfluss gegeben ist, so dass bezüglich der Zementart keine Einschränkungen bestehen. Auch hinsichtlich des unterschiedlichen Erhärtungsverhaltens spielt die Wahl des Zementes eine unterge-

	<b>RUBITHERM GR 41</b>	<b>RUBITHERM GR 54</b>
Zusammensetzung *		
Korngröße [mm]	1 – 3	0,2 – 0,6
Schüttgewicht [g/l]	750	750
Schmelzpunkt [°C]	≈ 45	≈ 54
PCM-Anteil Masse-%	≈ 34	≈ 34
Speicherkapazität [kJ/kg]	64	72
Temperaturbereich [°C]	35 – 50	46 – 61
maximale Arbeitstemperatur	70	85
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0,2	0,2
Spezifische Wärmekapazität [kJ/kgK]	1,5	1,5
Flammpunkt (Paraffin) [°C]	187	220
Volumenänderung	praktisch nicht vorhanden	
Korrosivität	chemisch inert	
Toxikologie	keine bekannte toxische Wirkung	
Wassergefährdung	nicht wassergefährdender Stoff	

Abb. 7.15 Kenndaten der verwendeten Latentwärmespeichermaterialien

\* SiO<sub>2</sub>, Paraffin, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO, K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O, Sonstige

ordnete Rolle. Für die Versuche wird ein Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL 32,5 R) verwendet, der sich neben seiner feinen Struktur auch durch einen geringeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei der Herstellung auszeichnet.<sup>32</sup>

Hinsichtlich der Bezeichnung der verwendeten PCM muss vorab ein Hinweis gestellt werden. Da zwischen einzelnen Materialarten und Produktnamen keine konsistente Durchgängigkeit bei der begrifflichen Zuordnung besteht, insbesondere weil PCM nicht immer in reiner Form verarbeitet werden, wird für die übergeordneten Termini Latentwärmespei-

chermaterial/PCM-Material/PCM folgende Vorgehensweise gewählt:

- PCM auf paraffinischer Basis statt Paraffin
- Für die im Rahmen der Versuchsarbeiten eingesetzten gebundenen PCM auf paraffinischer Basis
- Speichergranulate beziehungsweise nach der Herstellerfirma RUBITHERM-Material

Eine wichtige Grundvoraussetzung für die Arbeit mit PCM auf paraffinischer Basis ist die Bestimmung des Einsatzbereichs, auf den der Schmelzpunkt des PCM bezogen werden muss. Für die skizzierten Anwendungsfälle



Abb. 7.16 RUBITHERM GR 41 (KG 1 – 3 mm)



Abb. 7.17 RUBITHERM GR 54 (0,2 – 0,6 mm)

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Herstellung erster Funktionsmodelle

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Herstellung erster Funktionsmodelle

- innen, zwischen 20 und 25 °C  
 - außen, zwischen 40 und 50 °C (oder gegebenenfalls noch höher)

liegen verschiedene Produkte mit unterschiedlichen (Praxis-)Erfahrungen vor. (Abb. 7.15) Bei der Auswahl des PCM-Materials werden zunächst zwei verschiedene Vorgehensstrategien unterschieden. Einerseits ist zum Zeitpunkt der ersten Versuchsreihen das Verhalten und die Wirkungsweise von 'GR 25' (eine Art Kompositparaffin) noch nicht hinreichend erforscht;<sup>33</sup> andererseits bestehen hinsichtlich der Verarbeitung der Speichergranulate GR 41 und GR 54<sup>34</sup> gute Erfahrungen, gelten diese hinreichend erprobt und als sehr stabile PCM. Daher erfolgen zunächst parallel verlaufende Versuchsarbeiten. Bei der Fa. *RUBITHERM* in Fürstenwalde sollen Vorversuche mit 'GR 25' durchgeführt werden, da dieses PCM-Material sich für raumseitige Anwendungen gut eignet. Bis zur Klärung prinzipieller Einflussfaktoren (Aufschwemmung, Entmischung etc.) erfolgt die Anfertigung von Funktionsmodellen jedoch mit den 'höhergradigen' PCM. Bezüglich der Zusammenstellung der Korngrößen des Speichergranulats wird Material mit 0,2 – 0,6 mm sowie 1 – 3 mm verwendet. Kleinere Partikel erscheinen nicht sinnvoll, da diese dann in der Oberfläche nicht sichtbar werden, größere galt es zu vermeiden, da mit dem Ziel eines möglichst homogenen Erscheinungsbilds die Größe der Holzpartikel (4 mm) nicht überschritten werden sollte. Somit werden die Versuche schließlich mit *RUBITHERM* GR 41 (1 – 3 mm) (Abb. 7.16) und *RUBITHERM* GR 54 (0,2 – 0,6 mm) durchgeführt. (Abb. 7.17)

Für die Verwendung von PCM auf paraffinischer Basis beziehungsweise Speichergranulaten bestehen im Grunde zwei wesentliche Randbedingungen:

- Bei (Masse-)Anteilen < 15 % ist in der Regel kein thermischer Effekt mehr zu erwarten, allerdings ein ausreichender Brandschutz gewährleistet
- Bei (Masse-)Anteilen > 30 % sind aufgrund des relativ teuren Zuschlagmaterials hohe Bauteilkosten zu erwarten.

### 7.4.3 Herstellung erster Mischungen Betonage 1

Den geplanten Versuchsreihen werden wieder zwei Holzleichtbetonmischungen als Ausgangsrezeptur zugrunde gelegt. Wie bei den experimentellen Untersuchungen zu Holzleichtbeton als Material für thermisch aktive Bauteile, soll eine leichte, mit geringerem, sowie eine schwere Rezeptur, mit größerem Zementgehalt, getestet werden. Insgesamt werden aus den beiden Ausgangsrezepturen sechs unterschiedliche Mischungen aufgestellt, vier auf der Basis der leichten und zwei mit der schweren Variante. (Abb. 7.18) Ziel ist zunächst vor allem die Verarbeitbarkeit des Speichergranulats mit dem Holz-Ze-

ment-Wasser-Gemisch zu untersuchen. Darüber hinaus soll eine erste Einschätzung hinsichtlich der Druckfestigkeitswerte erfolgen und als weiteres Resultat der Einfluß der unterschiedlichen Korngröße des Speichergranulats auf das Gefüge und die Oberflächen aufgezeigt werden.

Die Mischungen werden zunächst sehr überschlägig anhand der Veränderung des Masse-Anteils von Holz und Paraffin berechnet. Bei den Mischungen a-b wird jeweils *RUBITHERM* GR 41 verwendet, bei den Mischungen c-d jeweils *RUBITHERM* GR 54. Bei den Rezepturen I a-b/c-d und II a-b/c-d wird 20 % des rechnerischen Holzmasseanteils von 250 beziehungsweise 135 kg/m<sup>3</sup> durch Speichergranulat auf 200 beziehungsweise 108 kg/m<sup>3</sup> reduziert («s»). Dagegen erfolgt bei der Rezeptur III a-b/c-d die Zugabe von 20 % PCM-Material zur Ausgangsmischung, das heißt der rechnerische Holzmasseanteil von 250 kg/m<sup>3</sup> bleibt unverändert («a»). Die weitere Differenzierung innerhalb der Rezepturreihen

Abb. 7.18 Übersicht über die Zusammensetzung der vorgenommenen Mischungen  
 \* Beim Holzanteil wurde etwa 1 kg der Siebfraktion 3 mm zugegeben

Rezeptur		Rohdichte (Ausgangs-) HLB	Zement-Anteil	Holz-Anteil	Wasser-Anteil	PCM-Anteil	W/Z-Wert
		kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	
Ia-b	20%/41/s	≈ 600	410	200 (250)	445	50	1,09
Ic-d	20%/54/s		410	200 (250)		50	
IIa-b	20%/41/s	≈ 1250	600	108 (135)	280	27	0,47
IIc-d	20%/54/s		600	108 (135)		27	
IIIa-b*	20%/41/a	≈ 600	410	250	445	50	1,09
IIIc-d*	20%/54/a		410	250		50	

resultiert aus den verwendeten Speichergranulaten.

Die Durchführung der Arbeiten erfolgt in den Räumen des Materialprüfungsamts für das Bauwesen (MPA Bau) der Technischen Universität München.<sup>35</sup>

Zunächst wird der Masseanteil der Materialien anhand der aufgestellten Rezepturtabelle auf eine Betonage von 25 Liter berechnet, exakt abgewogen und bereitgestellt. (Abb. 7.19) Für die Betonage verwendet man einen kleinen Zwangsmischer (50 Liter) der Firma Eichrich. (Abb. 7.20)

Die trockenen Zuschläge werden in der Reihenfolge: Holz, Zement und Speichergranulat in die Mischtrommel gegeben. Nach jeder Zugabe erfolgt eine kurze Mischphase von etwa 1 Minute. Zum Schluss wird das Anmachwasser zugegeben. Von jeder Frischbetonmischung ermittelt man anhand des Ausbreitmaßes die Frischbeton-Konsistenz. Im Anschluss erfolgt die Befüllung der Schalungen und die Herstellung der Prüfwürfel für die Druckfestigkeitsversuche. (Abb. 7.21–7.23) Insgesamt kann bei allen Rezepturen festgestellt werden, dass hinsichtlich der Verarbeitung der drei Zuschlagsstoffe – mit doch zum Teil deutlich abweichendem spezifischen Gewicht – kaum Probleme auftreten. Auch ohne die Verwendung von Betonzusätzen ist ein relativ gutes Frischbetongefüge<sup>36</sup> zu beobachten.

Die Versuchsreihe wird mit der leichtesten Rezeptur (R Ia-b) in Kombination mit dem 'grobkörnigen' Speichergranulat GR 41 begonnen. Da keine Erfahrungen bezüglich des Wasseranteils vorliegen, erfolgt die Wasserzugabe in abgestuften Schritten, wodurch sich insgesamt auch die Mischzeit etwas erhöht. Nach dem Einfüllen der ersten Hälfte des errechneten Zugabewassers hat der

Frischbeton zunächst noch eine sehr steife Konsistenz. Nachdem ein weiteres Viertel zugegeben ist, zeigt sich eine relativ rasche Veränderung von einem 'zähen' zu einem mehr 'sämigen' Zustand, so dass nach Einmischung von gut 80 % des Wasseranteils erstmals die Konsistenz geprüft wird. Mit 43 cm liegt der Frischbeton knapp über den erforderlichen 42 cm für die (Regel-)Konsistenzklasse C3/F3. Nach Augenschein und 'Fingerprobe' wird der erste Durchgang in Rücksprache mit den Betonprüfern für ausreichend gut befunden. Der W/Z-Wert = 0,88 liegt im oberen Bereich.

Beim zweiten Durchgang, Rezeptur Ic-d, mit dem 'pulverförmigen' Speichergranulat GR 54, erreicht man mit bereits reduziertem Wassergehalt die knapp ausreichende, plastische Konsistenz des Frischbetons. Der Unterschied in der Korngröße des Latentwärmespeichermaterials nimmt auf die Verarbeitbarkeit wie auch die Frischbetoneigenschaften keinen feststellbaren Einfluss.

Den Rezepturen IIa-b und IIc-d liegt ein deutlich höherer Zementanteil (etwa 46 %) zugrunde. Bei der angesetzten Betonage treten hinsichtlich der Mischung keine nennenswerten Unterschiede auf. Auffallend ist, dass mit ebenfalls reduziertem Wasseranteil, Rezeptur IIa-b um gut 8 % und Rezeptur IIc-d um knapp 6 %, eine bereits sehr gute Konsistenz

Abb. 7.19 Bemessung des Wasseranteils für die Mischung R Ic-d

Abb. 7.20 Zugabe des Wassers für die Mischung R II a-b

Abb. 7.21 Ermittlung des Ausbreitmaßes der Mischung R II c-d (47 cm)



Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Herstellung erster Funktionsmodelle

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Herstellung erster  
Funktionsmodelle



erreicht wird, die sich mit 47 cm im oberen C3/F3-Bereich bewegt. Der durch den hohen Zementgehalt bedingte, niedrige (Ausgangs-) W/Z-Wert sinkt durch den geringeren Wasseranteil auf 0,43 beziehungsweise 0,44. Auch bei der Rezeptur II kann kein Einfluss der unterschiedlichen Korngröße des Speichergranulats auf die Verarbeitbarkeit wie auch die Frischbetoneigenschaften festgestellt werden.

Die beiden abschließenden 'leichten' Betonen der Rezeptur III kennzeichnen gegenüber der Anfangs-Rezeptur I ein um 5 Volumen-Prozent höherer Holzanteil<sup>37</sup>. Darin liegt wohl begründet, dass die Menge des berechneten Anmachwassers, wie bei allen vorangegangenen Mischungen, zwar unterschritten wird, jedoch mit 10,24 Liter bei 92 % des Ausgangsgehaltes liegt (gegenüber knapp 81 % der Rezeptur I). Hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Frischbetoneigenschaften bestätigen sich die Beobachtungen der ersten vier Durchgänge. Das Material lässt sich gut verarbeiten und gewinnt nach Zugabe des letzten Viertels Wasser mit einem gewissen, Zeit versetzten Schub eine weiche, und besonders bei den leichteren Mischungen eine schwach fließende Konsistenz. Ferner scheinen eine verlängerte Mischzeit sowie partielle Pausen zusätzlich Einfluss auf den 'frischen' Holzleichtbeton zu

Abb. 7.22 Verdichtung der Prüfwürfel (15 cm) der Mischung R I a-b

Abb. 7.23 Glattstreichen der eingefüllten Mischung R II c-d

Abb. 7.24 Prüfwürfel und Plattenmuster nach dem Ausschalen

nehmen. Die Überprüfung des Ausbreitmaßes zeigt mit 44 beziehungsweise 43 cm wieder Werte im unteren Bereich der (Regel-)Konsistenz C3/F3. Der W/Z-Wert liegt durch den höheren Wasseranteil gegenüber den Rezepturen I bei 1.

Eine Nachbehandlung des Holzleichtbetons, vor allem gegen schnelles Austrocknen, erfolgt durch das Belassen in der Schalungsform sowie durch eine Abdeckung mit Folie.

Das Ausschalen der Elemente erfolgt vier Tage nach dem Betonieren.<sup>38</sup> Ansätze bereits am darauf folgenden Tag die Musterplatten und Prüfkörper auszuschalen muss man aufgrund des noch relativ starken Feuchtegehalts der Proben abbrechen. Nachdem Wochenende kann trotz einer Reihe von Feuchtestellen das Ausschalen problemlos vorgenommen werden. (Abb. 7.24)

Parallel zur 28-tägigen Abbindedauer im Klimaraum<sup>39</sup> werden die Platten im wöchentlichen Turnus gewogen. Hierbei sollen einerseits die Feuchteabnahme bei den unterschiedlichen Rezepturen, andererseits die Unterschiede zwischen verdichteten und unverdichteten Probekörpern überprüft werden.

Im Nachgang der Betonierungsarbeiten werden die einfachen Rezepturaufstellungen einer genaueren Stoffraumberechnung unterzogen. Dabei können eine Reihe von Abweichungen zu den vorliegenden Ausgangsdaten festgestellt werden.

So liegt die Summe des Volumen bezogenen Anteils der jeweiligen Zuschlagsstoffe bei den Rezepturen I a-d (1,12 m<sup>3</sup>) und III a-d (1,24 m<sup>3</sup>) deutlich über den Wert von 1 m<sup>3</sup>. Diese Unregelmäßigkeiten sind wohl auf den Zuschlagsstoff Holz zurückzuführen. Die an der EPF Lausanne/l-Bois verwendete Mischung und damit die zugrunde zu legende Rohdichte, ist nicht mehr genau zu ermitteln.

Rezeptur <sup>1</sup>	Zement-Anteil	Holz-Anteil	Wasser-Anteil	PCM-Anteil	Bezeichnung <sup>2</sup>	Gewicht	Abmessung (lxbxh)	Rohdichte	Bruchlast	Festigkeit <sup>3</sup>
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>		g	mm	kg/m <sup>3</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>
Ia-b	410	200 (250)	445	50	150 <sub>1</sub>	3737	150x150x147	1130	80,50	3,60
Ic-d	410	200 (250)		50	150 <sub>2</sub>	3651	150x150x147	1100	105,60	4,80
IIa-b	600	108 (135)	280	27	100 <sub>3</sub>	1514	100x100x99	1530	206,60	20,90
IIc-d	600	108 (135)		27	100 <sub>4</sub>	1513	100x100x99	1530	194,70	19,70
IIIa-b	410	250	445	50	150 <sub>5</sub>	3594	150x150x147	1090	105,90	4,80
IIIc-d	410	250		50	150 <sub>6</sub>	3169	150x150x146	960	58,60	2,70

Abb. 7.25 Kennwerte der untersuchten Mischungen (MPA BAU/TU München)

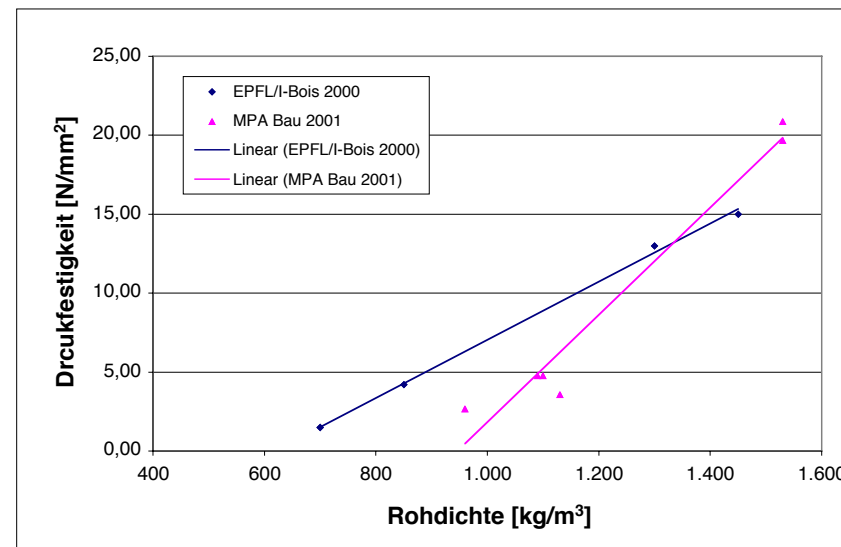
<sup>1</sup> Herstellungstag, 06.09.2001, <sup>2</sup> Prüfkörper verdichtet, <sup>3</sup> Prüfungstag, 04.10.2001

Die Hauptunbekannte stellt jedoch der Holzfeuchtegehalt dar, der entscheidenden Einfluss auf den Masse bezogenen Anteil des Zuschlagsstoffs nimmt. Kleinere Abweichungen können unter Umständen auch aus der Verwendung unterschiedlicher Zementarten herrühren. Dagegen war eine Erhöhung des Volumens bei der Variante "Addition zum Restholzanteil" (Rezeptur III) zu erwarten.

#### 7.4.4 Messergebnisse

Um erste Einschätzungen hinsichtlich der geänderten Rohdichten sowie der Druckfestigkeitswerte der Mischungen zu erlangen, wird je Rezeptur ein Norm-Prüfwürfel vermessen. Die Ergebnisse können jedoch nur 'grobe' Hinweise geben, denn wie groß die Abweichung, das heißt der Fehlerindikator sein kann, zeigen gerade die einzelnen Werte bei den leichten Mischungen, die um 25 % beziehungsweise über 45 % auseinander liegen, was im Fall der Rezeptur IIIc-d auch auf das deutlich geringere Prüfwüfelfgewicht zurückzuführen ist. (Abb. 7.25)

Abb. 7.26 Druckfestigkeitswerte der untersuchten Holzleichtbetonproben (EPFL/I-Bois 2000) und Holzleichtbetonproben mit Latentwärmespeichermaterialien (MPA Bau 2001)



Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Herstellung erster Funktionsmodelle

Zunächst ist festzustellen, dass mit dem gegenüber Holz fast dreifach schwereren Speichergranulat sich die Rohdichte erwartungsgemäß erhöht. Bei den Rezepturen I und III verdoppelt sich das spezifische Gewicht fast auf etwa  $1100 \text{ kg/m}^3$ . Auffällig ist, dass bei der Variante "Addition zum Restholzanteil" (Rezeptur III), beide Prüfkörper eine niedrigere Rohdichte aufweisen, das heißt dass der zusätzliche Holzanteil keinen Einfluss zu nehmen scheint. Die beiden Mischungen der Rezeptur II mit dem erhöhten Zementgehalt liegen bei  $1530 \text{ kg/m}^3$ .

Bezüglich der Druckfestigkeit von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien lässt sich – im Vergleich zu den an der EPF Lausanne/l-Bois ermittelten Ergebnissen – feststellen, dass bei den leichteren Mischungen die Rohdichtezunahme nicht mit einer nennenswerten Erhöhung der Druckfestigkeit einhergeht:  $4,80 \text{ N/mm}^2$  bei etwa  $1100 \text{ kg/m}^3$  gegenüber  $4,20 \text{ N/mm}^2$  bei einer Rohdichte von  $850 \text{ kg/m}^3$ . Mit Werten um  $5 \text{ N/mm}^2$  wäre jedoch eine wichtige Kenngröße, insbesondere für das Ausschalen erreicht.

Dagegen erhöht sich die Druckfestigkeit bei der schweren Rezeptur II mit dem Speichergranulat gegenüber der Holzleichtbeton-Ausgangsmischungen deutlich; das bei einem Zementgehalt von nur 60 %. Allerdings ist zu beachten, dass die Versuche mit den kleineren Prüfwürfeln mit 100 mm Kantenlänge durchgeführt werden mussten. Die beiden gemessenen Werte liegen um  $20 \text{ N/mm}^2$  bei einer Rohdichte von etwa  $1550 \text{ kg/m}^3$ , im Vergleich zu  $15,00 \text{ N/mm}^2$  bei von  $1450 \text{ kg/m}^3$ . (Abb. 7.26)

Ein Einfluss der unterschiedlichen Korngröße auf die Druckfestigkeit lässt sich nicht feststellen. Während bei der Rezeptur Ic-d mit dem 'pulverförmigen' Speichergranulat GR 54 eine höhere Bruchlast erreicht wird, liegen die

Werte der Rezepturen II c-d und III c-d unter denen der Mischungen mit dem 'grobkörnigen' Speichergranulat GR 41.

#### 7.4.5 Messreihen zum Masseverlust

Ein wichtiger Parameter hinsichtlich der Verarbeitbarkeit und der Festigkeit von Holzleichtbeton ist der Feuchtegehalt des Materials über die einzelnen Abbindephasen<sup>40</sup>, vom Ansteifen über das Erstarren<sup>41</sup> bis zum Erhärten und darüber hinaus. Im Rahmen dieser Versuche können für die ersten 12 Stunden keine Daten erhoben werden, da sich die Prüfkörper zum Teil nicht entschalen ließen. Gleichwohl erscheint es wichtig, den Verlauf des Masseverlustes durch die Abnahme der Feuchtigkeit zu analysieren. Diese Messreihen werden sowohl an den Musterplatten als auch an den Prüfwürfeln durchgeführt. Die vier Messungen erfolgen nach dem Ausschalen (4 Tage nach der Betonage) sowie nach 14, 22 und 28 Tagen. Anhand von zwei Prüfkörpern der Rezeptur Ia-b wird die Entwicklung über weitere zwei Monate verfolgt.

Bei allen Prüfkörpern tritt ein Masseverlust ein; dieser beträgt bei den leichteren Rezepturen I und III im Mittel etwa 17 %, bei der schweren Rezeptur II um die 5 %. Darüber hinaus zeigt sich, dass nach der Hälfte der Zeit eine markante Beschleunigung der Feuchtigkeitsabnahme erfolgt, die sich in der letzten Messwoche wieder verlangsamt. Diese Effekte sind bei den Mischungen mit dem höheren W/Z-Wert ebenfalls wesentlich deutlicher ausgeprägt. Ferner bestätigt der Vergleich zwischen verdichteten und unverdichteten Prüfwürfeln, dass in der Regel bei allen Mischungen die Feuchteabnahme mit dem Verdichten geringer ausfällt. Überraschend dagegen ist der relativ große Unterschied zwischen den Rezepturen IIIa-b

und IIIc-d. Die Mischung mit dem 'pulverförmigen' Speichergranulat GR 54, weist sowohl bei den Prüfwürfeln als auch bei den Musterplatten ein geringeres Gewicht (zwischen 12 und 16 %) auf und der Masseverlust erreicht Werte bis zu 20 %. (Abb. 7.27) Insgesamt zeigt sich, dass der Wasseranteil bei den Holzleichtbetonmischungen vielfach noch zu hoch ist, ein Effekt, der durch eine hohe Feuchte des Holzzuschlags noch zusätzlich verstärkt werden kann. Dieser zum Teil beträchtliche Masseverlust führt zwangsläufig zu einem erheblichen Schwindverhalten des Materials.

Betrachtet man die Entwicklung über einen längeren Zeitraum, ist festzustellen, dass nach 28 Tagen dieser Prozess noch nicht abgeschlossen ist. Zwar vermindert sich der Masseverlust, aber innerhalb von zwei Monaten ist eine Gewichtsabnahme von erneut etwa 10 % zu verzeichnen. Dabei gleichen sich die Unterschiede zwischen verdichteten und unverdichteten Prüfwürfeln weitgehend an. (Abb. 7.28)

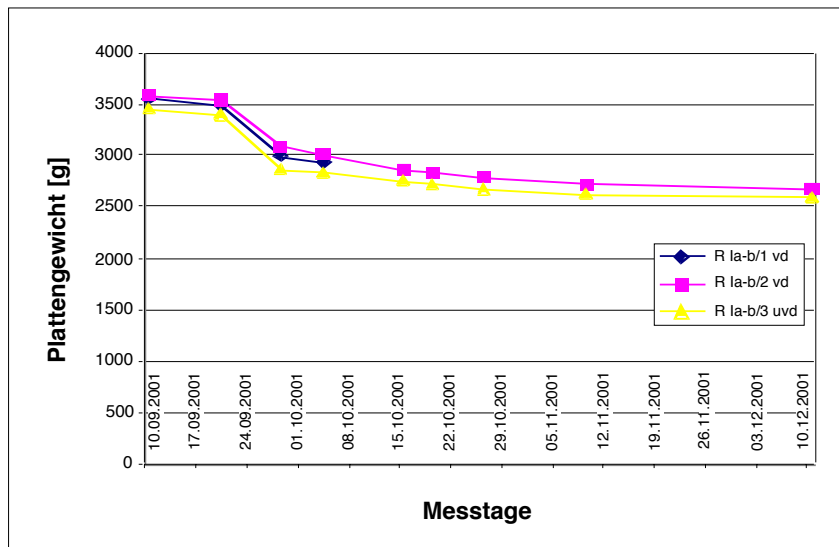
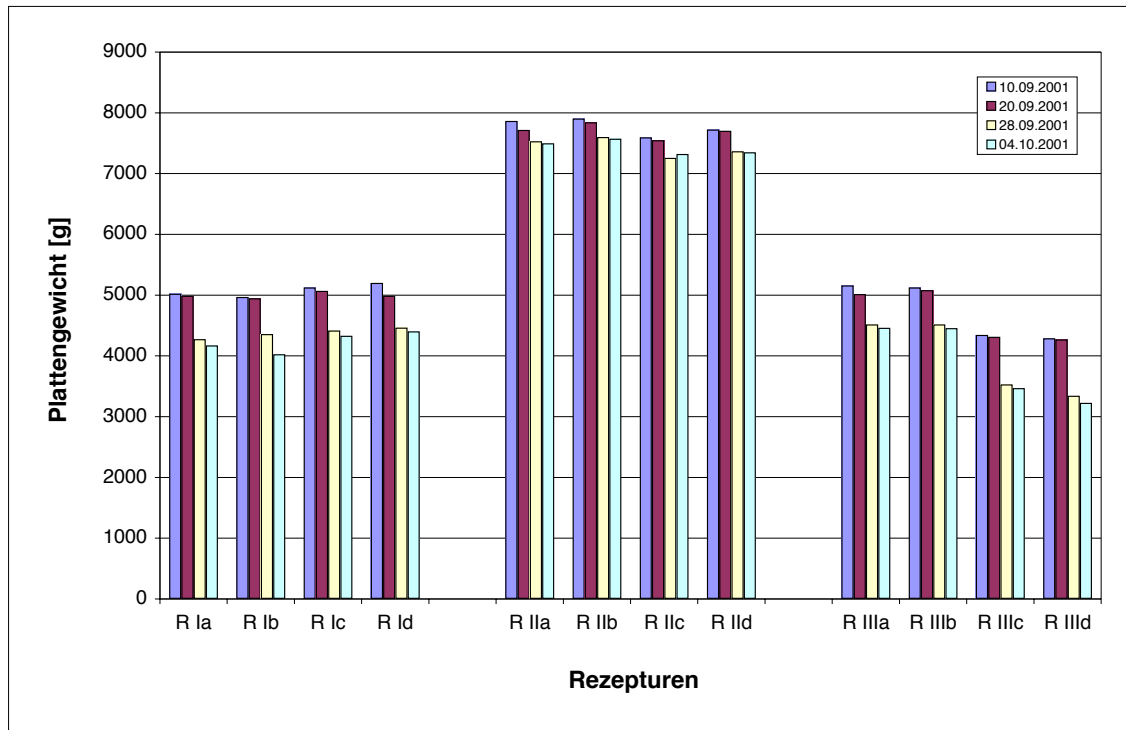
#### 7.4.6 Oberflächen und Zwischenfazit

Neben den Testläufen zur Verarbeitbarkeit von Holzleichtbeton mit organischen Latentwärmespeichermaterialien sowie ersten Untersuchungen zu baukonstruktiven Eigenschaften, sind auch materialspezifische Merkmale hinsichtlich der Oberflächenbeschaffen-

Abb. 7.27 Gemessene Werte (28 Tage) der Masseverluste (Platten) der untersuchten Rezepturen (MPA BAU/TU München)

Abb. 7.28 Gemessene Werte (3 Monate) der Masseverluste (Prüfwürfel 150 mm) von R Ia-b (MPA BAU/TU München)  
vd = verdichtet / uvd = unverdichtet





heit sowie der farblichen Ausprägung von großem Interesse. Für einen Baustoff, der auch sichtbar im Gebäudefassadenbereich beziehungsweise in Raum umschließenden Flächen eingesetzt werden soll, stellen die Möglichkeiten der Oberflächengestaltung beziehungsweise -bearbeitung ebenfalls wesentliche Entscheidungskriterien für einen Einsatz dar.

Hier zeigt sich bei den Versuchsreihen, dass nach dem Ausschalen (Abb. 7.24), durch die Ablagerung von Feinstanteilen des Zementes an der Oberfläche, ein relativ homogenes Erscheinungsbild sichtbar wird, das zunächst kaum Unterschiede zu Normalbeton erkennbar werden lässt. Es dominiert das dunklere Grau des Portlandkompositzementes in den hergestellten Platten der schwereren Mischung, während bei den leichteren Mischungen ein wärmerer Gelb-Braun-Ton vorherrscht.

Ganz anders präsentiert sich der Zustand, wenn die Holzleichtbetonoberfläche bearbeitet, in diesem Fall gesägt wird. In der angeschnittenen Fläche werden sowohl die Holzpartikel als auch das Speichergranulat optisch prägnant wirksam, erinnern die Oberflächen an rötlich gelbe bis graugelbe Naturwerksteine. (Abb. 7.29–7.31)

Mit Zunahme des Holzanteils gewinnt das Material einen warmen Grundton. Selbst bei den Mischungen mit höherem Zementanteil wird die sonst eher 'kalte' Wirkung des Normalbetons auf angenehme Weise abgemildert. Die sehr gute Verteilung der Holzpartikel lässt sich in allen Oberflächen zeigen. Für dieses gleichmäßige Bild sorgt auch die relativ kleine Korngröße (4 mm) des Restholzes. Besonders markant sind die Einsprengsel des 1–3 mm großen Speichergranulats GR 41 in den a-b-Mischungen. (Abb. 7.29+7.30) Während bei den leichteren Mischungen schöne,

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Herstellung erster Funktionsmodelle

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Optimierung der  
Mischungen

weiche Komplementäreffekte entstehen, führt der kräftige Zementstein zu einem kontrastreichen Ausdruck.

Dagegen tritt das pulverförmige Granulat GR 54 in der Gesamtwirkung deutlich zurück, verstärkt aber auch bei diesen Mischungen durch die rötlich-braune Tonerde einen angenehm warmen Ausdruck. (Abb. 7.31)

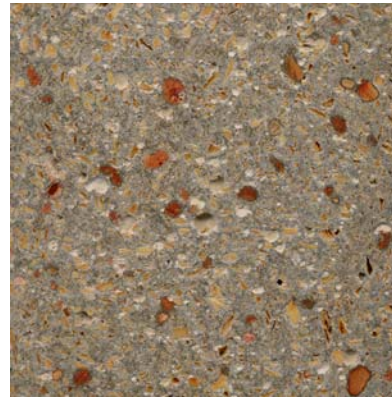
Insgesamt kann nach den durchgeführten ersten experimentellen Arbeiten zum Verbund von Holzleichtbeton und Latentwärmespeichermaterialien eine positive Einschätzung vorgenommen werden. Die Verarbeitbarkeit ist gut und die Druckfestigkeitswerte liegen im Bereich des Erforderlichen. Als viel versprechendes Resultat erscheinen die optisch sehr ansprechenden Oberflächen des Kompositmaterials.

Gleichwohl stellt sich eine Reihe von Problemen ein. Zum einen tritt mit dem hohen W/Z-Wert ein starker Masseverlust insbesondere bei den leichten Mischungen auf. Ferner zeigen sich Ungenauigkeiten bei der nachträglich zu den Mischungen durchgeführten Stoffraumberechnungen. Insgesamt muss bilanziert werden, dass der Masse bezogene Anteil der Speichergranulats mit einer Größenordnung um die 4 % hinsichtlich eines thermisch wirksamen Verhaltens deutlich zu niedrig ausfällt.

Abb. 7.29 Rezeptur II a-b (Darstellung 1:1)

Abb. 7.30 Rezeptur III a-b (Darstellung 1:1)

Abb. 7.31 Rezeptur I c-d (Darstellung 1:1)



## 7.5 Optimierung der Mischungen

### 7.5.1 Aufstellen neuer Rezepturen

Wie dargestellt, konnten anhand der durchgeführten Versuchsreihe erste Ergebnisse zu der Kombination von Holzleichtbeton und organischen Latentwärmespeichermaterialien ermittelt werden. Im Zusammenhang mit zwei der wesentlichen Zuschlagsstoffe, Holz und PCM-Material, zeigt sich, dass detaillierte Untersuchungen vorgeschaltet beziehungsweise Korrekturen unternommen werden müssen.

#### Speichergranulat

Die Berechnung des Granulats erfolgt bezogen auf den Holzmasseanteil, der einerseits um 20 % durch PCM substituiert, andererseits um 20 % des ursprünglichen Holzmasseanteils durch PCM ergänzt wird.

Diese Vorgehensweise lässt jedoch zwei wesentliche Randbedingungen außer Acht: Ein Kilogramm Speichergranulat enthält nur in etwa 30 % 'reines' Paraffin/Wachs. Die Berechnung des PCM-Anteils muss bezogen auf die Gesamtmasse der jeweiligen Rezeptur erfolgen.<sup>42</sup>

Für praxisnahe Anwendungen stellt vor allem die Optimierung des Verhältnisses von Festigkeit und Wärmespeicherkapazität ein wichtiges Arbeitsziel dar.

Der Masseanteil des Granulats wird wesentlich durch die Anforderung an hohe Festigkeit und gute Verarbeitbarkeit der Mischung sowie den daraus resultierenden PCM-Inhalt bestimmt. Neben der im Vergleich zum PCM auf paraffinischer Basis ( $\approx 970 \text{ kg/m}^3$ ) höheren Rohdichte ( $1200 \text{ kg/m}^3$ ), stellt auch der Anteil der sensiblen Wärme im Granulat eine noch unbekannte Größe dar, die das thermodynamische Verhalten beeinflusst.

Da sich mit Zunahme des Granulatanteils das spezifische Gewicht zum Teil deutlich erhöht und negative Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit nicht ausgeschlossen werden können, erscheinen Rezepturen mit einem Gesamtmasseanteil von > 40 % nicht sinnvoll.<sup>43</sup> Dagegen sinkt bei Mischungen < 20 % der Anteil des PCM auf paraffinischer Basis bereits auf < 6 % und lässt für die (spezifische) Wärmekapazität im Holzleichtbeton kaum noch Steigerungen erwarten.

Da ein Optimum im Verhältnis von Festigkeit und Wärmespeicherkapazität bei etwa 30 % Granulatmasseanteil zu erwarten ist,<sup>44</sup> sollen begleitet noch jeweils Mischungen mit 20 % (≈ 6 % PCM auf paraffinischer Basis) und 40 % (≈ 12 %) hergestellt werden.

Organische PCM-Materialien mit für den Innenausbau sinnvollen Schmelztemperaturen von etwa 25 °C – das heißt mit einem Schmelzpunkt deutlich unter 30 °C – sind zum Zeitpunkt der Untersuchungen nur im Labor getestet worden. Dabei bereitet die Homogenität des Materials Probleme für das sich bisher keine Langzeitstabilität einstellt.<sup>45</sup> So arbeitet man beim Hersteller an der Kombination unterschiedlicher Arten, deren Verbund sich weitgehend wie ein GR 25 verhält, aber letztlich ein Mix mit vielen Begleitproblemen bleibt. Als problematisch gestaltet sich ferner, dass dieses PCM auf paraffinischer Basis in sehr kleinen Mengen per Hand hergestellt wird und daher zum Teil auch große Schwankungen in der Zusammensetzung aufweist.<sup>46</sup> Weitere zum Teil "elementare technische Probleme" sind bei niedrig schmelzenden PCM auf paraffinischer Basis:<sup>47</sup>

- hoher Dampfdruck
- Wasserverträglichkeit vor allem bei der Herstellung, das heißt Austausch von Wasser und Paraffin<sup>48</sup>
- Trocknungstemperaturen zwischen 100 und 150 °C

Nach Angaben des PCM-Herstellers bestehen bei den erprobten und am Markt erhältlichen Speichergranulaten GR 41 und GR 54 diese Schwierigkeiten nicht beziehungsweise sind die Gefahren bei "sanften" Trocknungsverfahren "relativ gering".<sup>49</sup>

Prinzipiell sind bei den PCM auf paraffinischer Basis 'offene' und 'geschlossene' Systeme zu unterscheiden. Die meisten am Markt befindlichen Speichergranulate sind als Verbundmaterialien offene Systeme. Daher kann es bei Temperaturen im Bereich des Schmelzpunktes, zum Beispiel bei Hydratationswärme (≈ 40 °C), bereits zum 'Ausschwitzen' des PCM beziehungsweise in Verbindung mit Wasser zu 'Auswaschungen' kommen.

Bei geschlossenen Systemen, den mikrokapselten PCM-Materialien, ist ein 'Wasserzugang' unterbunden. Bei dieser Art der Konfektionierung ist jedes 'Paraffin-Partikel' (jeder Wachs-kern) komplett in einer Polymerhülle von 3 bis 20 µm eingekapselt.<sup>50</sup> Dadurch gelten diese PCM-Materialien sogar als kochfest; sie sind allerdings auch entsprechend teurer als der Verbund in Speichergranulaten.

Da sich GR 41 und GR 54 hinsichtlich der Verarbeitbarkeit bewährt haben und für die Ermittlung baukonstruktiver sowie bauphysikalischer Kenngrößen keine Nachteile zu erwarten sind, stellen die für den späteren Anwendungsbereich nur eingeschränkt nutzbaren Latentwärmespeichermaterialien für die Optimierung der Mischungen zunächst keine Hemmnisse dar.

Somit werden die in den Vorversuchen eingesetzten Speichergranulate GR 41 und GR 54 der Fa. *RUBITHERM* weiter verwendet.

Die vorgenommene Auswahl erscheint darüber hinaus anwendungsbezogen durchaus sinnvoll. Einsatzmöglichkeiten von höher schmelzenden Paraffinen bestehen zum Bei-

spiel im Bereich von opaken Flächen in doppelschaligen Glasfassaden, da dort deutlich höhere Temperaturen auftreten.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass für den Einsatz im Innenbereich Schmelztemperaturen weit unter 30 °C erforderlich sind. Neben der Schmelztemperatur ist aber das Entladeverhalten von besonderer Bedeutung. Ist eine Wand erstmal 'beladen', besteht die Notwendigkeit, die darin eingespeicherte Wärme wieder abzugeben. Da das Entladepotenzial durch Konvektion begrenzt ist, muss bei Anwendungen im Innenbereich, vor allem im Verwaltungsbau, der Einsatz passiver Kühlungsstrategien und/oder eine technische Klimatisierung mit in Betracht gezogen werden.

#### Verwendete Holzrestfraktion

Bei der Bestimmung der Rezepturen treten mit dem Holz als Zuschlagsmaterial vorab eine Reihe von Schwierigkeiten auf. Für die Berechnung der Stoffmengen werden zunächst die beiden in den vorangegangenen Bearbeitungsschritten benutzten Holzleichtbeton-Rezepturen wieder zugrunde gelegt.

Bei einer näheren Überprüfung mittels einer klassischen Stoffraumberechnung stellt sich heraus, dass für die beide Rezepturen kein stimmiges Ergebnis bezogen auf 1 m<sup>3</sup> zu erzielen ist; die Abweichungen betragen im Extremfall über 40 %. Da die Kennwerte zu Roh- und Schüttdichte bei Zement, Wasser und dem Speichergranulat bekannt sind, können die Abweichungen nur beim Holz liegen.

Desweiteren ist zu berücksichtigen, dass die Versuche an der EPF Lausanne/l-Bois mit unterschiedlichen Sieblinien (und Mischungen) hergestellt wurden, und daher kein einheitlicher Wert für das Holz für die Berechnungen zugrunde gelegt werden konnte.<sup>51</sup>

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Optimierung der Mischungen

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Optimierung der  
Mischungen



Einen schwierig zu bestimmenden Parameter stellt gerade die im Restholz vorhandene Holzfeuchte dar, so dass ebenfalls nicht mehr exakt verifiziert werden konnte, welche Holzfeuchten im Zuschlagsmaterial bei den durchgeführten Versuchen an der EPF Lausanne/ I-Bois vorhanden waren.<sup>52</sup> Gliniorz/Natterer weisen darauf hin, dass in der Fachliteratur bei den physikalischen Kennwerten selten auf Holzteilchen oder Holzgemische eingegangen wird.<sup>53</sup>

Nach der Ermittlung von Ausgangswerten und der Überprüfung des Luftporengehalts sowie einer Stoffrückraumrechnung zu den jeweiligen Siebfractionen erfolgt in mehreren Schritten die Bestimmung der Rohdichte. Der Unterschied von bis zu  $137 \text{ kg/m}^3$  resultiert aus der unterschiedlichen Anzahl eingeschlossener Luftporen.

Zur Bestimmung des Schüttgewichts des Restholzes nach unterschiedlicher Größe beziehungsweise Siebfraction und Feuchtegehalt, liegen noch keine differenzierten Untersuchungen vor.<sup>54</sup> Daher wird im Rahmen der Versuchsarbeit, ausgehend von den Firmenangaben<sup>55</sup>, zunächst mit  $250 \text{ kg/m}^3$  ein erster Schätzwert angenommen.

Die Korngrößenverteilung führt bei schüttfähigen Materialien stets zu einer Separierung. Am Institut für Holzforschung der Technischen Universität München wird daher zu-

Abb. 7.32 Vibrationsrinne mit Restholzfraktion zur Befüllung ...

Abb. 7.33 ... wiegen des Maßzylinders für die Schüttdichtebestimmung

Abb. 7.34 Schnelldarrwaage ("Ultra X" = 711) zur Ermittlung des Holzfeuchtegehalts

sätzlich eine Schüttgewichts- sowie eine Feuchtebestimmung der Restholzfraktion durchgeführt. (Abb. 7.32+7.33)

Um den Wasseranteil genau bestimmen zu können, ist die Kenntnis der Holzzeigenfeuchte wichtig. Diese setzt sich aus der Oberflächen- und Kernfeuchte zusammen. Beim Abbindeprozess reagiert nur das Oberflächenwasser mit dem Zement und beeinflusst die Konsistenz des (Frisch-)Betrons. Gliniorz/Natterer stellen heraus, dass es sich in der Praxis als schwierig erweist, eine exakte, massenmäßige Bestimmung von Oberflächen- und Kernfeuchte für eine Stoffraumberechnung vorzunehmen. Daher wird ein Mittelwert von "25% Wassermasseanteil des Holzes" vorgeschlagen.<sup>56</sup>

Da es sich bei dem verwendeten Holz um Restholz aus der Holzbearbeitung handelt,<sup>57</sup> ist bezüglich des Feuchtegehalts zu berücksichtigen, dass ein sehr hoher Anteil von Splintholz vorliegt. Besonders bei frisch geschlagenem Fichtenholz weist Splintholz einen bis zum Faktor 5 höhere Holzfeuchte ( $\approx 150 \%$ ) auf, als Kernholz ( $\approx 30 \%$ ).<sup>58</sup> Auch die Lagerung im Freien ist zu berücksichtigen, da durch Regenfälle gerade im Bereich der oberflächennahen Schichten eine zusätzliche Wasseraufnahme erfolgt. Wie groß die Spanne bezüglich der Holzfeuchte bei dem für die Versuche verwendeten Material ist, zeigen die Untersuchungen am Institut für Holzforschung. (Abb. 7.34) Bei Lieferung des Materials, direkt von den Halden in Plastiksäcke verpackt, beträgt der Feuchtegehalt bei ersten Messungen zunächst etwa  $120 \%$ . Bereits nach 40 Stunden Raumlagerung ist dieser um bis zu  $30 \%$  gesunken.

Wie groß die Abhängigkeit von Lieferung und Lagerung des Holzmaterials ist, verdeutlicht

der Verlauf nach weiteren 10 Tagen, in denen sich die Holzfeuchte insgesamt um den Faktor 10 auf nur mehr 12 % (im Normklima<sup>59</sup>) reduziert. (Abb. 7.35)

#### Zugabewasser

Bezüglich des Wasseranteils zeigen die vorangegangenen Versuche zum Teil deutlich niedrigere Werte (bis zu 20 %) des ursprünglichen Wassergehalts. Daher und in Abhängigkeit von den ermittelten Holzfeuchtegehalten, wird den Rezepturen nur mehr ein Wassermasseanteil von 75 % zugrunde gelegt. Dieser Wert berücksichtigt einerseits die oben genannten Angaben; andererseits bleibt mit niedrigen Ausgangswerten die Möglichkeit einer Nachsteuerung bestehen.

#### Stoffraumberechnung

Nachdem im Vorfeld die Zuschlagsstoffe einer genaueren Untersuchung unterzogen wurden, soll eine Stoffraumberechnung als fundierte Grundlage für beide Rezepturreihen erstellt werden. Die einzige fest bestimmte Größe ist der (ab der Betonage 2 verwendete) Portlandzement (CEM I 32,5 R) mit einer Rohdichte von 3100 kg/m<sup>3</sup>. Die Ausgangsgleichung für die leichtere Mischung ( $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ) sowie die schwerere ( $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ ) lautet:

$$1 \text{ m}^3 = \text{Zement} + \text{Holz} + \text{Wasser}$$

$$1 \text{ m}^3 = (410/3100) + (250/x) + (445/1000)$$

$$x = 250 / (1 - (410/3100) - (445/1000))$$

$$1 \text{ m}^3 = (600/3100) + (135/x) + (280/1000)$$

$$x = 135 / (1 - (600/3100) - (280/1000))$$

Für den Anteil des Zugabewassers wird den Berechnungen zunächst der ursprünglich angegebene Wert zugrunde gelegt. Nach abermaliger Sichtung der Fachliteratur sowie nach Rücksprache mit einer Reihe von Fachleuten

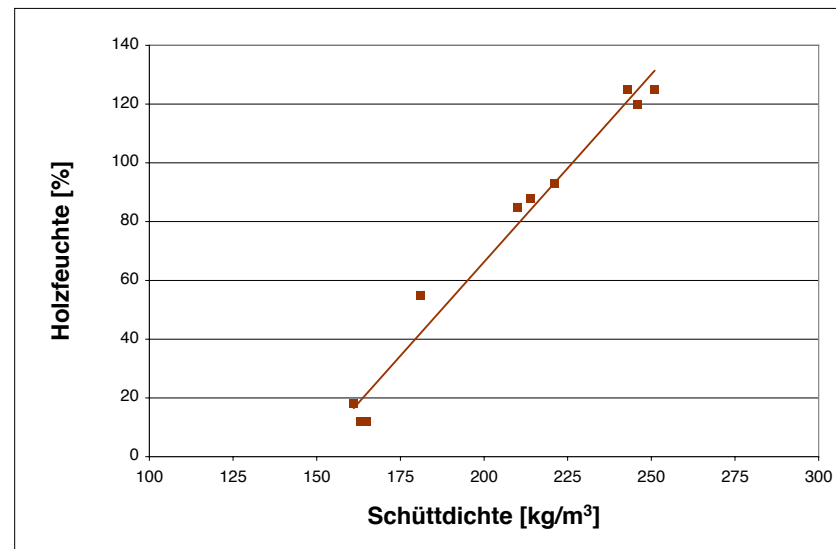


Abb. 7.35 Holzfeuchte des Restholzgranulats in Abhängigkeit von Lieferung und Lagerung (Untersuchung am Institut für Holzforschung/TU München)

bleiben hinsichtlich der Restholzfraktion letztlich bis zum Schluss zwei Fragen offen:

- Wird den Berechnungen die Schüttdichte (lose eingelaufen beziehungsweise eingerüttelt) oder die Rohdichte zugrunde gelegt?
- Mit welchem Wert ist die Stoffraumberechnung durchzuführen?

Insgesamt stehen sieben zum Teil beträchtlich von einander abweichende Kennwerte zur Verfügung.<sup>60</sup>

Zunächst wird festgelegt, die Berechnung mit der Rohdichte fortzuführen, insbesondere da dieser Wert für Zement einzusetzen ist. Bei der näheren Betrachtung von fünf Stoffraumberechnungen zeigen die zurückgerechneten Kennwerte der Ausgangsrezepturen für den Zuschlag Holz mit 590 kg/m<sup>3</sup> für die leichtere

beziehungsweise 250 kg/m<sup>3</sup> für die schwere Rezeptur sehr unterschiedliche Zahlen. Werden beide Rezepturen mit dem höheren Rohdichtewert von Fichtenholz (470 kg/m<sup>3</sup>) gerechnet, beträgt die Abweichung etwa plus 10 % beziehungsweise minus 24 %. Reduziert man nun den Wasseranteil aufgrund des anzunehmenden Holzfeuchtegehalts um 25 %, so zeigt sich bei der leichteren Mischung mit 0,998 m<sup>3</sup> eine exakte Übereinstimmung, während bei der schweren Mischung sich der Wert mit 0,691 m<sup>3</sup> nochmals, auf mehr als 30 % verringert.

Weitere Versuche einer Angleichung führen zu keinem brauchbaren Resultat. Auch die Berücksichtigung eines Luftporenanteils<sup>61</sup> zwischen 8 und 14 % kann die Unterschiede nicht beheben. Daher werden den beiden ge-

Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Optimierung der  
Mischungen

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Optimierung der  
Mischungen

planten Rezepturreihen folgende Ausgangsdaten zugrunde gelegt: Der Volumen bezogene Anteil des Holzes wird mit  $400 \text{ kg/m}^3$  berechnet (für Fichte stellt dieser Wert die untere Grenze dar und für die beiden Ausgangsrezepturen wird damit fast eine Art Mittelwert von  $420 \text{ kg/m}^3$  erreicht). Für das Zugabewasser werden 75 % der ursprünglichen Masseanteile angesetzt.

Daraus resultieren nachfolgende Angaben:

Rezepturen I - V:

1  $\text{m}^3$  = (1,091  $\text{m}^3$ )  
Zement:  $410 \text{ kg} / 3100 \text{ kg/m}^3 = 0,132 \text{ m}^3$   
Holz:  $250 \text{ kg} / 400 \text{ kg/m}^3 = 0,625 \text{ m}^3$   
Wasser:  $334 \text{ kg} / 1000 \text{ kg/m}^3 = 0,334 \text{ m}^3$

Rezepturen VI - VIII:

1  $\text{m}^3$  = (0,741  $\text{m}^3$ )  
Zement:  $600 \text{ kg} / 3100 \text{ kg/m}^3 = 0,194 \text{ m}^3$   
Holz:  $135 \text{ kg} / 400 \text{ kg/m}^3 = 0,338 \text{ m}^3$   
Wasser:  $210 \text{ kg} / 1000 \text{ kg/m}^3 = 0,210 \text{ m}^3$

Aufbauend auf die festgelegte Basisrezeptur erfolgt die Berechnung des Speichergranulatanteils. Bei dessen (Neu-)Bemessung wird eine moderate Aufstockung gewählt. Für die Rezepturen I - V wird in 5 %-Schritten, ausgehend von 30 % bis 50 % der Holzmasseanteil durch das Granulat ersetzt. Für die Rezepturen VI - VIII ist mit 5 % der niedrigste Wert angesetzt, während die beiden abschließenden Stufen 20 % und 30 % betragen.<sup>62</sup> (Abb. 7.36)

### 7.5.2 Herstellung der optimierten Mischungen (Betonage 2)

Die Herstellung der optimierten Mischungen erfolgt in zwei Schritten á jeweils vier Rezepturen.<sup>63</sup> Je nach Anzahl von Prüfkörpern und Musterplatten ist eine Betonage von 100 beziehungsweise 150 l erforderlich. Von jeder Rezeptur werden mindestens drei Prismen

Rezepturen		Rohdichte (Ausgangs-) HLB	Zement-Anteil	Holz-Anteil	Wasser-Anteil	Paraffin-Anteil	W/Z-Wert
		$\text{kg/m}^3$	$\text{kg/m}^3$	$\text{kg/m}^3$	$\text{kg/m}^3$	$\text{kg/m}^3$	
I	30%/41	≈ 600	410	175	334	116	0,81
II	35%/41	≈ 600	410	162,5	334	153	
III	40%/41	≈ 600	410	150	334	191	
IV	45%/41	≈ 600	410	137,5	334	228	
V	50%/41	≈ 600	410	125	334	266	
VI	5%/41	≈ 1250	600	128,25	210	331	0,35
VII	20%/41	≈ 1250	600	108	210	392	
VIII	30%/54	≈ 1250	600	94,5	210	432	

Abb. 7.36 Übersicht über die Zusammensetzung der optimierten Mischungen

und maximal fünf Prüfcylinder hergestellt: (Abb. 7.37)

- Prüfcylinder für die Druckfestigkeits- und E-Modul-Messungen  
 $\varnothing 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$
- Prismen für die Biegezugfestigkeits-Messungen  $150 \times 150 \times 700 \text{ mm}$

Darüber hinaus erfolgt die Anfertigung von Musterplatten für Untersuchungen im Sonnensimulator sowie für erste Brandversuche und eine Frost-Tau-Wechsel-Prüfung:

- Platten  $298 \times 298 \times 60 \text{ mm}$  (Rezeptur III und VI)
- Platte  $600 \times 600 \times 60 \text{ mm}$  (Rezeptur V)

Für die Herstellungsarbeiten wird ein großer Zwangsmischer mit 300 l Fassungsvermögen und mit Einkippvorrichtung der Zuschläge der Firma Eirich verwendet. (Abb. 7.38)

In einem ersten Durchgang werden die Rezepturen I, II und III sowie VI hergestellt. Vier Tage später erfolgt die Betonage der restli-

chen Mischungen R IV und V sowie R VII und VIII.

Zunächst muss der Masseanteil der Materialien anhand der aufgestellten Stoffraumberechnung auf die erforderliche Betonage berechnet, exakt abgewogen und bereitgestellt werden. Neben den unterschiedlichen Massenanteilen des PCM-Materials wird bei der schwersten Mischung (R VIII) statt dem grobkörnigeren RUBITHERM-Material GR 41 (1–3 mm), das feinkörnigere GR 54 (0,2–0,6 mm) verwendet.

Da sich ein Einfluss der unterschiedlichen Korngrößen auf die Druckfestigkeit nicht feststellen ließ, und das Speichergranulat GR 41 nur eingeschränkt zur Verfügung steht, wird dieses vor allem zum Vergleich der Oberflächen bei den Mischungen mit dem erhöhtem PCM-Anteil verwendet.

Die Trockenmischung wird in leicht geänderter Variante zur Betonage 1 durchgeführt.

Die Zuschläge werden diesmal in der Reihenfolge: Holz, Zement, PCM-Material in den 'Beschicker' gefüllt und über die Einkippvorrichtung in die erhöht angeordnete Mischtrommel gegeben. Nach einer kurzen Mischphase erfolgt die Zugabe des Wasseranteils.

Die Ermittlung der restlichen Feuchte in den Holzspänen wird mit einer Darrtrocknung auf einer Elektro-Heizplatte durchgeführt. Das Holz wird ausgewogen (500 g) und anschließend solange erhitzt, bis die Feuchtigkeit verdampft ist. Nach dem anschließenden Wiegen des trockenen Materials (230 g) kann aus der Differenz der Feuchteanteil im Zuschlagsstoff ermittelt werden: (Abb. 7.39)

$$u = \frac{500_u - 230_o}{230_o} \cdot 100 [\%]$$

Für das verwendete Material resultiert daraus eine Holzfeuchte  $u = 117 \%$ .

Von jeder Frischbetonmischung wird anhand des Ausbreitmaßes die Frischbeton-Konsistenz sowie mit dem Luftgehalt-Prüfgerät die Rohdichte und der Luftporengehalt ermittelt. Die Rohdichte des Frischbetons kann Hinweise auf die Gleichmäßigkeit der Zusammensetzung geben und im Vergleich zu einer Soll-Rohdichte Fehler in der Herstellung anzeigen. "Beim Leichtbeton kann von der Frischbetonherstellung auf die Trockenrohddichte des Festbetons geschlossen werden."

Mit dem selben Prüfgerät (Volumen 8 l) wird der Gehalt an Luftporen bestimmt, der Hinweise auf den Verdichtungsgrad des Frischbetons gibt.<sup>64</sup> (Abb. 7.40)

Im Anschluss erfolgt die Herstellung der Prüfkörper für die Festigkeitsversuche sowie die Befüllung der Schalungen. Die Prismen und Prüfzylinder werden analog einer C20/25

(B 25)-Herstellung auf einem Rütteltisch (15 Sekunden) verdichtet. (Abb. 7.41)

Begonnen wird mit der Mischung R I, die den höchsten Holzanteil in der 'leichten' Reihe aufweist. Da die ermittelte Holzfeuchte einen weiter reduzierten Wasserbedarf erwarten lässt, wird das Zugabewasser stufenweise zugegeben und bei 30 l (etwa 90 %) ein erstes Ausbreitmaß genommen; mit 35 cm liegt dieses deutlich unter den erforderlichen 42 cm. Nach Zugabe weiterer 2 l ist mit 46 cm die (Regel-)Konsistenz C3/F3 erreicht.

Bei dieser Betonage zeigt sich, dass der frische Holzleichtbeton nach mehrmaligem Mischen, und weiterer Wasserzugabe, zum Schluss nahezu sprunghaft von einer mehr zähen, zu einer weichen Konsistenz übergeht. Dies erfordert bei der Wasserzugabe ein hohes Maß an Einschätzungsvermögen der Frischbetonqualität durch die Betonprüfer. Der verarbeitete Wassergehalt erreicht letztlich knapp 96 % des errechneten Wertes, was angesichts der relativ hohen Holzfeuchte überrascht; im Vergleich zu dem Ausgangswert beträgt der Wasseranteil 72 %. Der W/Z-Wert liegt im Vergleich zur Rezeptur I a-b/c-d (Betonage 1) mit 0,78 gegenüber 0,88 etwas niedriger; dies ist wohl auf den doppelt so hohen PCM-Anteil zurückzuführen. Bei einer Frischbetonrohddichte von 1,067 kg/dm<sup>3</sup> liegt der Luftporenanteil bei 17 %.

Abb. 7.37 Prüfzylinder und Prismen für die Festigkeitsmessungen

Abb. 7.38 Großer Zwangsmischer (300 Liter) mit Einkippvorrichtung für die Zuschläge

Abb. 7.39 Bestimmung der Holzfeuchte durch 'Auskothen' des Wasseranteils



Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Optimierung der Mischungen



Abb. 7.40 Ermittlung des Luftporengehalts des Frischbetons mit dem 'Luftporentopf'

Abb. 7.41 Verdichtung von Prüfzylindern auf einem Flachrüttler



Nach der Mischung der Rezeptur I erfolgt ebenfalls eine vereinfachte Überprüfung des Wassergehalts im Frischbeton durch Darrtrocknung. Dabei werden 1000 g eingewogen und auf der oben genannten Heizplatte unter ständigem Rühren stark erhitzt, bis kein Wasserdampf mehr aufsteigt. Nach dem Abkühlen wird die Probe (603 g) wieder gewogen. Anhand des Masseverlustes lässt sich eine nicht gebundene Feuchte  $U = 66 \%$  feststellen.

Bei der Rezeptur II fällt der Wasseranteil etwa um 7 % niedriger aus, liegt damit bei nur mehr 70 % des Ausgangswertes, so dass im ersten Durchgang bereits die Regelkonsistenz mit 45 cm erreicht werden kann. Mit Zunahme des PCM-Masseanteils gegenüber R I (4 %) erhöht sich erwartungsgemäß etwas die Frischbetonrohddichte ( $1,118 \text{ kg/dm}^3$ ); der Luftporenanteil ist mit 20 % dennoch (deutlich) höher.

Die anschließende Betonage (R III) muss zunächst aufgrund der zusätzlichen Plattenherstellung auf 150 l erhöht werden. Bei dieser Mischung zeigt sich, dass mit längeren Mischzeiten eine höhere Feuchtigkeitsabgabe des Holzzuschlags einhergeht; dies erschwert partiell die Beurteilung der Konsistenz. Der Frischbeton scheint häufiger eine ausreichende Konsistenz aufzuweisen, indes gelingt erst im dritten Versuch die Erzielung der weichen Konsistenzklasse. Ein Wasseranteil von fast 98 % des Ausgangswertes, führt zu einem W/Z-Wert = 0,8. Obwohl bei weiterer Zunahme des PCM-Masseanteils (3 %) der Luftporengehalt mit 17 % wieder den Wert der Rezeptur I aufweist, fällt die Frischbetonrohddichte ( $1,079 \text{ kg/dm}^3$ ) der Mischung etwas niedriger aus.

Als letzte Betonage des ersten Durchgangs wird die Rezeptur VI aus der schwereren Reihe hergestellt. Hier spiegeln sich die vorge-

nannten Ungenauigkeiten in der Stoffraumberechnung auch in der Herstellung wider. Erst im vierten Versuch kann ein Ausbreitmaß genommen werden, das jedoch immer noch zu niedrig ausfällt, und das obwohl der errechnete Wasseranteil bereits mit 40 % überschritten ist. Mit weiteren 2 l wird gerade der untere Grenzwert der (Regel-)Konsistenz C3/F3 erreicht (42,50 cm). Der Gesamtwasseranteil von 46 l liegt um 10 % über dem Ausgangswert.

Trotz des hohen Wasseranspruchs ist der W/Z-Wert mit 0,51 gegenüber 0,43 beziehungsweise 0,44 nur leicht über den Werten der Rezeptur II a-b/c-d (Betonage 1), bei einem um den Faktor 8 (24 Masse-Prozent) höheren PCM-Anteil. Erwartungsgemäß liegt durch den höheren Zementanteil auch die Frischbetonrohddichte mit  $1,334 \text{ kg/dm}^3$  deutlich über den bisher gemessenen Werten; dies führt zu einem reduzierten Luftporenanteil von 13 %.

Der zweite Teil der Betonage startet mit der Rezeptur IV. Hier zeigt sich, dass mit einem erhöhten Wasseranteil beim ersten Ausbreitmaß die Regelkonsistenz noch nicht erreicht wird (41 cm). Nach Zugabe eines weiteren Liters ist ein Sprung auf 46 cm zu verzeichnen, das heißt mit Zugabe von 3 % Wasser erhöht sich das Ausbreitmaß um etwa 13 %. Mit dem verarbeiteten Wasseranteil weist diese Mischung insgesamt den höchsten W/Z-Wert (0,87) auf. Die Frischbetonrohddichte steigt bei einem Luftporengehalt von 18 % auf  $1,153 \text{ kg/dm}^3$ .

Bei der Herstellung der Rezeptur V, mit 23 Masse-Prozent dem höchsten PCM-Anteil in der 'leichten' Versuchsreihe, bestätigen sich im Wesentlichen die vorher gemachten Erfahrungen. Der Wasseranteil liegt etwa 5 % über dem errechneten Wert, was zu einem W/Z-



Wert von 0,85 führt. Der durch den hohen PCM-Anteil niedrigere Holzzuschlag spiegelt sich in Frischbetonrohddichte ( $1,268 \text{ kg/dm}^3$ ) und Luftporengehalt (13 %).

Demgegenüber treten bei der Herstellung der Rezeptur VII größere Probleme mit dem Zubehwasser auf. Erst im vierten Versuch, mit einem um 70 % höherem Wasseranteil kann ein erstes Ausbreitmaß genommen werden (40 cm), und mit einem weiteren Liter wird erst eine ausreichend weiche Konsistenz erzielt; damit summiert sich der Wasseranteil auf dreiviertel des Ausgangswerts. Hoher Zement- und PCM-Anteil führen zu einem Luftporengehalt von 10 % bei einer Frischbetonrohddichte von  $1,391 \text{ kg/dm}^3$ .

Die abschließende Rezeptur VIII unterscheidet sich zusätzlich durch das feinere PCM-Material. Hier wird von Beginn an der Wasseranteil deutlich erhöht und erreicht mit 36 l etwa die Größenordnung von Rezeptur VII (37 l). Insgesamt wird der ursprüngliche Wert (der Holzleichtbeton-Ausgangsmischung ohne PCM) immer noch um knapp 30 % überschritten; der W/Z-Wert liegt bei 0,60. Die nochmals höhere Frischbetonrohddichte von  $1,488 \text{ kg/dm}^3$  lässt in Verbindung mit dem feinen Zuschlagsmaterial auch einen geringeren Luftporenanteil erwarten, was die Messungen mit 5,6 % – dem mit Abstand niedrigsten Wert in der Versuchsreihe – bestätigen.

Nach Durchführung der beiden Rezepturreihen der Betonage 2 können gegenüber den ersten Versuchen insgesamt eine Reihe von Beobachtungen bestätigt werden. Bei allen Rezepturen zeigt sich, dass hinsichtlich der Verarbeitung der drei Zuschlagsstoffe kaum Probleme auftreten. Ein schwieriger Parameter bleibt jedoch die Bestimmung des Wasseranteils in Abhängigkeit von der Feuchte

des Holzzuschlags. Vor allem bei den schwereren Mischungen (R VI bis VIII) wird der Rechenwert bis zu 3/4 überschritten, was jedoch (angesichts des hohen Zementanteils) immer noch zu günstigen W/Z-Werten zwischen 0,50 und 0,60 führt.

Bei den Frischbetoneigenschaften zeigen sich ebenfalls einige Unterschiede zwischen den beiden Rezepturreihen. So kann zunächst bei den leichteren Mischungen I bis IV bezüglich Rohddichte und Luftporengehalt keine lineare Abhängigkeit hinsichtlich der Zunahme des PCM-Anteils beziehungsweise Abnahme des Holzanteils festgestellt werden. Insbesondere Rezeptur II fällt mit einem Luftporengehalt von 20 % heraus, während bei Rezeptur III die Rohddichte des Frischbetons mit  $1,079 \text{ kg/dm}^3$  einen niedrigeren Wert aufweist. Dagegen nimmt bei den schwereren Mischungen VI bis VIII mit dem PCM-Anteil jeweils mit zunehmender Rohddichte der Luftporengehalt ab.

Nach der Herstellung der Probekörper und Musterplatten werden diese in einem Klimaraum mit definierten Konditionen (Raumlufttemperatur  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 65 % Luftfeuchte) zunächst eine Woche abgedeckt, anschließend vom achten bis zum achtundzwanzigsten Tag offen gelagert.

## 7.6 Baukonstruktive Eigenschaften

Zur Beurteilung eines (neuartigen) Baustoffs sind umfangreiche materialspezifische Untersuchungen erforderlich. Im Rahmen der experimentellen (Optimierungs-)Arbeiten mit Holzleichtbeton und PCM-Material werden Messungen zu zwei grundlegenden Bereichen vorgenommen:

- Baukonstruktive Eigenschaften
- Bauphysikalische Eigenschaften

Zum einen umfasst dies Prüfungen hinsichtlich Kenndaten zum mechanischen Verhalten, wie Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, E-Modul, die wiederum am Materialprüfungsamt für das Bauwesen (MPA Bau) der Technischen Universität München durchgeführt werden. Zum anderen erfolgen Untersuchungen zum thermischen Verhalten, das heißt Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Schmelzenthalpie sowie Vermessung von Proben im Sonnensimulator. Diese finden am ZAE Bayern, Abt. 2: Wärmedämmung und Wärmetransport, in Würzburg statt.

Die Arbeiten erstrecken sich auf alle acht im Zuge der Betonage 2 angefertigten Mischungen. Darüber hinaus werden zu ausgewählten Rezepturen noch weitere, ergänzende Untersuchungen durchgeführt, die sowohl das Materialverhalten nach der Herstellung und den Gefügebau behandeln, sowie Einschätzungen zum Brandverhalten, der Dauerhaftigkeit und dem Verhalten bei feuchtetechnischer Beanspruchung ermöglichen.

Mechanische Prüfungen von Baustoffen charakterisieren deren Verhalten auf mechanische Beanspruchungen. Die erforderlichen Materialeigenschaften um diese Spannungen aufnehmen zu können, betreffen den "gesamten Bereich der Beanspruchbarkeit, angefan-

Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Baukonstruktive  
Eigenschaften



Abb. 7.42 Prüfzylinder (R III, links/ R VI/IV)1, rechts) mit unterschiedlichem Bruchbild nach Druckfestigkeitsversuch

Abb. 7.43 Prüfzylinder (R II/2) mit offener Bruchstelle nach Druckfestigkeitsversuch



gen vom Gebrauchszustand eines Bauteils bis hin zu dessen Versagen.<sup>65</sup>

Allerdings sind die Anforderungen an Baustoffe hinsichtlich Festigkeit und Verformungsverhalten bei statisch beanspruchbaren Bauteilen wesentlich höher, als bei nicht tragenden Komponenten.

Wichtige Parameter zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit eines Materials sind einerseits die Druckfestigkeit, die sehr stark die Einsatzbereiche bestimmt, sowie andererseits der E-Modul, der Aufschluss über die Homogenität und den Aufbau des Gefüges gibt.

### 7.6.1 Druckfestigkeit

Eine Prüfung der Druckfestigkeit kann bei Bauwerken und Bauteilen sowohl zerstörend (anhand entnommener Proben) als auch zerstörungsfrei (durch Schlagprüfungen) erfolgen. Bei gesondert hergestellten Probekörpern wird diese stets in einem zerstörenden Verfahren ermittelt. Dazu ist eine sorgfältige Behandlung der Probekörper, insbesondere der Stirnflächen bei Prüfzylindern zu beachten. Bei der Druckfestigkeitsprüfung unter Kurzzeitbelastung wird in einer hydraulischen Prüfmaschine eine Bruchlast  $F$  einachsrig auf den Probekörper kontinuierlich so aufgebracht, dass in Sekundenintervallen die Druckspannung um  $0,5 \text{ N/mm}^2$  zunimmt, bis der Gefügeverbund bricht. (Abb. 7.45) Anhand des Bruchbildes lassen sich erste Rückschlüsse auf das Materialverhalten schließen.

Beton ist ein heterogener Verbundwerkstoff. Daher werden dessen Festigkeitseigenschaften und Bruchverhalten wesentlich von dem Gefügebau bestimmt. Darüber hinaus unterliegt die Festigkeit beim Beton den Erhärtingsbedingungen, das heißt ist ein zeitabhängiger Parameter.<sup>66</sup> Beim Holzleichtbeton mit Speichergranulaten sind dabei zwei Einflussfaktoren zu berücksichtigen:

die Zuschläge weisen unterschiedliche Elastizitäten ( $>$  Holz) und Festigkeiten ( $>$  Granulat) untereinander, aber auch gegenüber dem Beton auf. Dies beeinflusst die Verbundwirkung maßgeblich und hat damit Auswirkungen auf den Bruchmechanismus.

Dies spiegeln die unterschiedlichen Bruchbilder aus den Rezepturreihen bei den durchgeführten Druckfestigkeitsversuchen wider. Bei den leichteren Mischungen ist ein stark asymmetrischer Bruch festzustellen, der mehr auf ein Abscheren schließen lässt. Dagegen zeigen die schwereren Mischungen (zum Beispiel Rezeptur VI) ein eher symmetrisches Bruchbild. Das ist auf einen dichteren Gefügebau zurückzuführen, der dadurch eine bessere Lastverteilung ermöglicht. (Abb. 7.42–7.43)

Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass die Prüfzylinder nach 28 Tagen im Kern meist noch feucht sind. Insgesamt zeigen die Bruchflächen jedoch eine gute, homogene Verteilung der einzelnen Zuschlagsstoffe.

Hinsichtlich der Druckfestigkeitswerte sind im Vergleich zu den Ergebnissen der Betonage 1 eine Reihe von Übereinstimmungen festzustellen. Es zeigt sich, dass sich mit dem gegenüber Holz fast dreifach schwereren PCM-Material die Rohdichte – wie erwartet – erhöht. Bei den Mischungen I bis V (Ausgangsrohichte Holzleichtbeton  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ) beträgt der Holzmasseanteil zwischen 17 und 11 % und der Anteil des PCM-Materials zwischen 11 und 23 %; bei den Mischungen VI bis VIII (Ausgangsrohichte Holzleichtbeton  $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ ), jeweils 6 bis 9 % beziehungsweise 24 bis 29 %.

Die durchgeführten Messungen (an Prüfzylindern) bestätigen ferner die Tendenz, dass die Kombination mit dem PCM-Material bei den schwereren Mischungen höhere Druckfestig-

keits-Werte wie von Holzleichtbeton bei etwa gleicher Rohdichte erkennen lassen. Die Festigkeiten der leichteren Rezepturen I bis IV bewegen sich bei Rohdichten um 1050 kg/m<sup>3</sup> zwischen 4 und 5 N/mm<sup>2</sup>; Rezeptur V erreicht bei einer Dichte von 1150 kg/m<sup>3</sup> bereits 6 N/mm<sup>2</sup>. Damit liegen die Zahlen etwas über denen der Betonage 1, die jedoch anhand von Prüfwürfeln (150 und 100 mm) ermittelt wurden. Rechnet man die Zylinderdruckfestigkeit auf eine Würfeldruckfestigkeit mit dem Faktor 1,25 beziehungsweise 1,18 um, dann erhöhen sich die Werte auf einen Bereich zwischen 5 und 7,5 N/mm<sup>2</sup>. Gleiches gilt für die schwereren Rezepturen VI bis VIII. Die Rohdichten liegen im Bereich von 1300 und 1400 kg/m<sup>3</sup> deutlich unter den 1530 kg/m<sup>3</sup> der Rezepturen II a-b/c-d. Somit erreichen die Zylinderdruckfestigkeiten Werte zwischen 11,6 und 16,7 N/mm<sup>2</sup>; rechnet man diese Werte ebenfalls hoch, liegen die Würfeldruckfestigkeiten zwischen 15 und 20 N/mm<sup>2</sup>. (Abb. 7.44)

Als abschließende Messung erfolgt anhand der Betonage 5 (leichte Ausgangsmischung  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$  mit Fliesmitteln) eine weitere Druckfestigkeitsprüfung. Bei einer Rohdichte von 620 kg/m<sup>3</sup> und Werten von 1,94 N/mm<sup>2</sup> decken sich die Ergebnisse mit den an der EPF Lausanne/I-Bois ermittelten Kenngrößen von Holzleichtbeton. (Abb. 10.5.2d)

Mit diesen Ergebnissen werden wesentliche Ausgangsdaten bestätigt. Werte (der Zylinder-)Druckfestigkeit um 5 N/mm<sup>2</sup> stellen insbesondere für den Zeitpunkt des Ausschalens eine wichtige Kenngröße dar, die auch ausreichendes Potenzial für weitere Optimierungen verspricht. Im Vergleich der Rohdichten des Frischbetons und des Festbetons zeigt sich, dass die Werte nach der Herstellung, bedingt durch den Feuchtigkeitsanteil, im Mittel zwi-

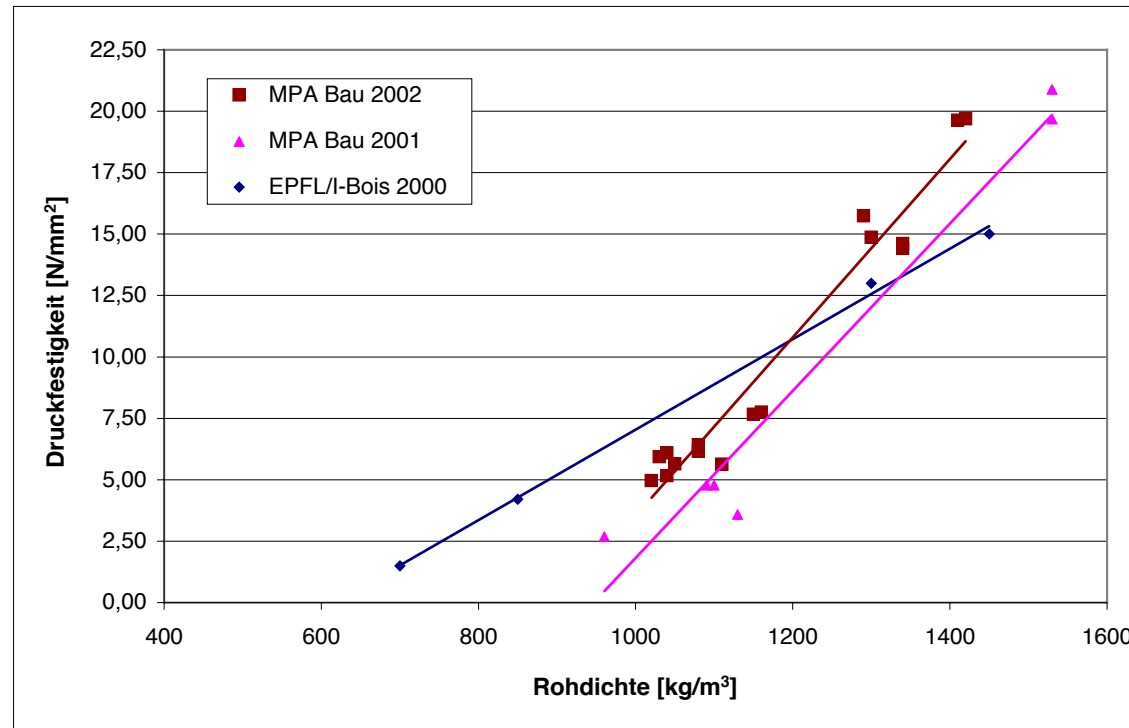


Abb. 7.44 (Würfel-)Druckfestigkeiten der untersuchten Holzleichtbetonproben (EPFL/I-Bois, 2000) und Holzleichtbetonproben mit Latentwärmespeichermaterialien (MPA Bau 2001/Betonage 1; MPA Bau 2002/Betonage 2)

Abb. 7.45 Druckfestigkeitsmessungen an einem Prüfcylinder  $\varnothing 150 \text{ mm}$  an der MPA BAU/TU München



Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Baukonstruktive Eigenschaften

Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Baukonstruktive  
Eigenschaften



Abb. 7.46 E-Modul-Messung an einem Prüfzylinder  $\varnothing$  150 mm

Abb. 7.48 Biegezugfestigkeits-Messung an einem Prüfprisma 100 x 100 x 700 mm

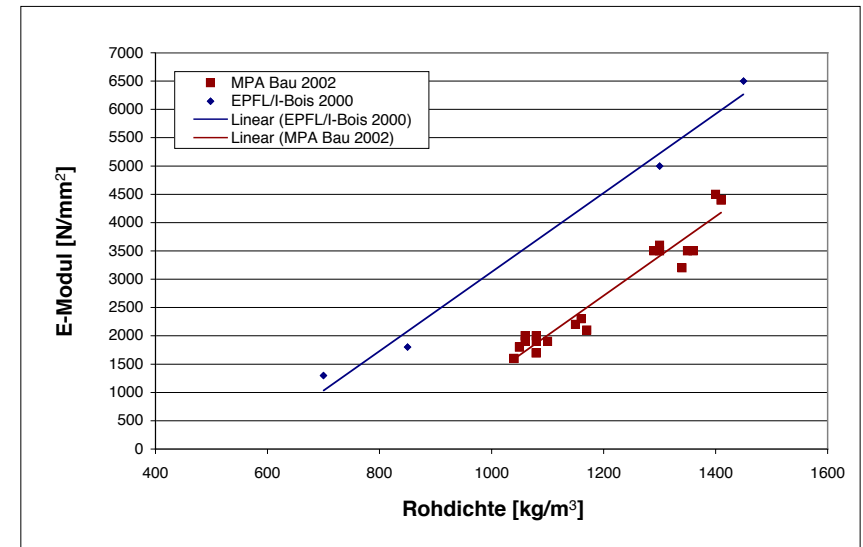
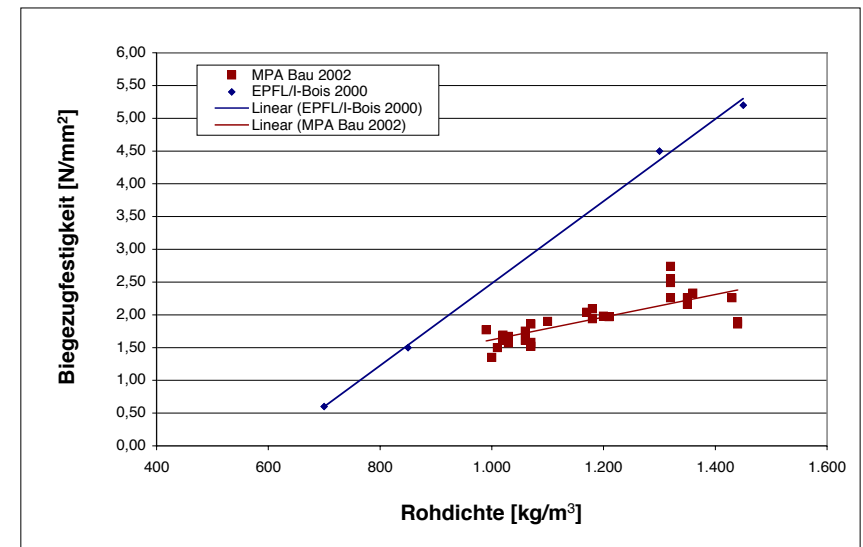


Abb. 7.47 E-Modulwerte untersuchter Holzleichtbetonproben (EPFL/I-Bois, 2000) und HLB mit PCM (MPA Bau 2002)

Abb. 7.49 Biegezugfestigkeitswerte untersuchter Holzleichtbetonproben (EPFL/I-Bois, 2000) und HLB mit PCM (MPA Bau 2002)



schen 3 und 6 % über der Trockenrohddichte liegen. Dabei lässt sich beobachten, dass die Abweichung bei den leichteren Mischung höher ist (Maximalwert  $\approx 8\%$  bei R V), und bei beiden Rezepturreihen mit steigendem Anteil des Speichergranulats zunimmt. Wohl in Abhängigkeit des Zementanteils, fällt dieser Anstieg bei der schwereren Messreihe gedämpfter aus.

### 7.6.2 E-Modul und Biegezugfestigkeit

Die Messungen des Elastizitätsmoduls (E-Modul) erfolgen ebenfalls an einer hydraulischen Prüfmaschine. Dabei wird eine definierte einachsige Prüfspannung  $\sigma$  auf den Probekörper kontinuierlich aufgebracht, bis in dem Gefügeverbund eine Formveränderung auftritt, die mittig gelagerte Messfühler am Zylindermantel (Messlänge 150 mm) aufzeichnen. (Abb. 7.46) Der E-Modul stellt für die Homogenität und für tragende Bauteile als Maß der Verformbarkeit, des elastischen Verhaltens von Materialien, eine wichtige Größe dar.

Im Vergleich der Holzleichtbeton-Mischungen (ohne und mit PCM) zeigen die Messungen eine vergleichbare Tendenz wie bei der Prüfung der Druckfestigkeit. Allerdings bestehen Unterschiede innerhalb der Rezepturreihen. Beim E-Modul verlaufen beide Kurven nahezu parallel, wobei die Zunahme der Rohdichte auch bei der schweren Mischung sich nicht positiv auswirkt. Beim 'normalen' Holzleichtbeton sind die Zahlenwerte bei etwa gleichem spezifischen Gewicht im Schnitt etwa um den Faktor 1,5 höher.

Bei den Rezepturen I bis V liegt der E-Modul zwischen 1600 und 2300 N/mm<sup>2</sup>. Mit der Zunahme der Rohdichte (und damit des Zementgehalts) der Rezepturen VI bis VIII verdoppelt sich der E-Modul auf Werte zwischen 3500 und 4500 N/mm<sup>2</sup>. Allerdings können wohl durch den geringeren Holzanteil in den

Probe	W/Z-Wert	Rohdichte* (MPa) $\rho$	Druckfestig- keit $\beta_{\text{Zylinder}}$	Druckfestig- keit $\beta_{\text{Würfel}}$	E-Modul E $\beta$	Biegezug- festigkeit $\beta_{\text{Bz}}$
		[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
R I	0,78	1.029	4,05	5,06	1.600	1,58
R II	0,76	1.079	4,83	6,03	1.933	1,82
R III	0,80	1.039	4,64	5,79	1.833	1,60
R IV	0,87	1.069	4,90	6,13	1.800	1,62
R V	0,85	1.166	6,17	7,71	2.200	2,00
R VI	0,51	1.304	12,25	15,31	3.533	2,51
R VII	0,62	1.348	11,61	14,51	3.400	2,25
R VIII	0,60	1.419	16,67	19,66	4.433	2,00

Abb. 7.50 Rohdichtewerte  $\rho$  (MPa Bau/TU München) und untersuchte baukonstruktive Parameter von Holzleichtbetonproben mit Latentwärmespeichermaterialien

\* Mittelwerte aus den drei Festigkeitsprüfungen

HLB-PCM-Mischungen die Werte von Holzleichtbeton (6.500 N/mm<sup>2</sup> bei einer Rohdichte von 1.450 N/mm<sup>2</sup>) nicht erreicht werden. In dieser Messreihe werden vor allem Unterschiede zwischen der Zunahme an Rohdichte und Abnahme des E-Moduls (zwischen Rezeptur VI und VII) sichtbar, die sich nicht schlüssig erklären lassen. (Abb. 7.47) Anhand der Spannungs-Diagramme der E-Modulmessungen wird der sehr homogene Aufbau des Komposit-Materials bestätigt.

Bei der Prüfung der Biegezugfestigkeit wird auf dem balkenförmigen Probekörper (Prisma) über zwei, in den Drittelpunkten des Auflagers ansetzende Lastschneiden eine Bruchlast F aufgebracht und bis zum Bruch kontinuierlich gesteigert. (Abb. 7.48)

Im Vergleich mit 'normalem' Holzleichtbeton zeigen die Messergebnisse ein anderes Bild gegenüber den vorangegangenen Untersuchungen.

Zum einen besteht eine relativ große Streuung der Werte auch innerhalb der Rezepturreihen, zum anderen erreicht die Biegezugfestigkeit der Holzleichtbetonmischungen mit Speichergranulat nur etwa 50 % der Werte des Ausgangsmaterials.

Die leichten Rezepturen I bis V liegen im Bereich von 1,50 bis 2,10 N/mm<sup>2</sup> (1,50 N/mm<sup>2</sup> bei  $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ , EPF Lausanne/l-Bois), die schweren Rezepturen VI bis VIII etwas darüber bei 1,90 bis 2,70 N/mm<sup>2</sup>. Dagegen zeigen die Untersuchungen an der EPF Lausanne/l-Bois doch (Spitzen-)Werte bis 5,20 N/mm<sup>2</sup>, bei einer Rohdichte von 1.450 kg/m<sup>3</sup>. (Abb. 7.49)

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Baukonstruktive Eigenschaften

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Bauphysikalische  
Eigenschaften

Bei der Biegezugfestigkeit wird ebenfalls deutlich, dass mit der Abnahme des Holzanteils trotz erhöhter Rohdichte durch das PCM-Material keine Erhöhung der Festigkeitswerte einhergeht. Das Speichergranulat stellt neben dem geringeren 'elastischen' Verhalten gegenüber dem Holz, im Vergleich zum Holzteilchen auch keinen 'zähen' Verbund mit dem Zementstein her. Die Bruchbildung erfolgt stets relativ sauber zwischen dem 'Tonerde'-Granulat und dem Zementstein.

Die durchgeführten Prüfungen zeigen für den angestrebten Anwendungsbereich von Holzleichtbeton als Material für nichttragende (Außen-)Wände viel versprechende Ergebnisse. In weiteren Versuchs- und Testreihen muss insbesondere das Verhalten unter Belastung in der und die Auswirkungen auf die Zementleimmatrix eingehender analysiert werden. Insgesamt werden hinsichtlich des mechanischen Verhaltens eine Reihe von positiven Eigenschaften deutlich. Der Verbund von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien weist ausreichende (Mindest-)Druckfestigkeiten auf und die Untersuchungen des Elastizitätsmoduls lassen ein sehr homogenes Materialgefüge erkennen. (Abb. 7.50)

## 7.7 Bauphysikalische Eigenschaften <sup>67</sup>

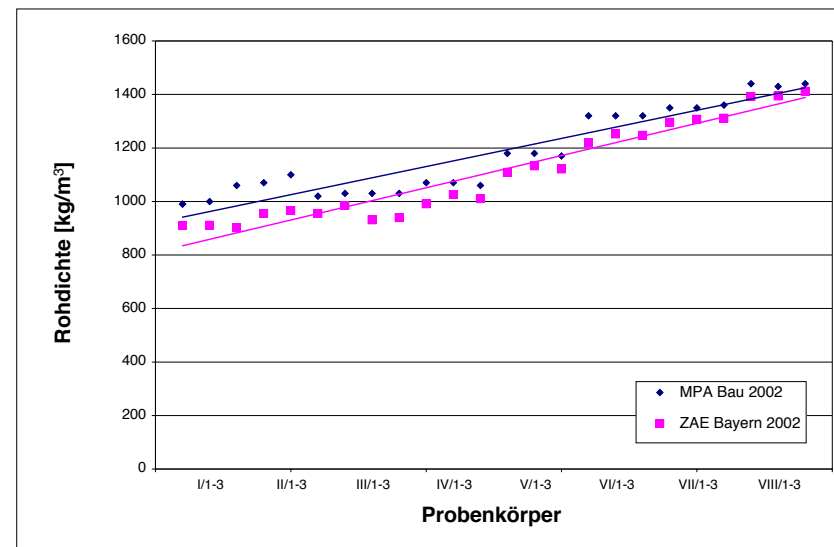
Nach den experimentellen Arbeiten zur Verarbeitung und Herstellung von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien sowie der Untersuchung von Festigkeitseigenschaften, fehlen noch wichtige Untersuchungen zur Einschätzung des thermischen Verhaltens des Kompositmaterials. Ergänzt werden die Versuche durch Testreihen in einem Sonnensimulator zur Verifizierung der Schmelzenthalpie. Die Materialprüfungen zur Bestimmung von Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität erfolgen wieder beim ZAE Bayern in Würzburg.

Von jeder Rezeptur werden aus den Prismen für die Biegezugfestigkeitsprüfungen jeweils

drei verschiedene Probenstücke mit den Abmessungen 50 x 50 x 20 mm hergestellt. Anhand dieser Proben sollen die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  sowie die Schmelzenthalpie  $H_s$  der einzelnen Holzleichtbeton-Rezepturen mit Latentwärmespeichermaterialien bestimmt werden. Diese Messungen stellen auch eine wichtige Grundlage für eine spätere Potenzialabschätzung mit Computer gestützten Simulationen dar.

Darüber hinaus stehen zwei Musterplatten, mit den Abmessungen 290 x 290 x 60 mm, zur Verfügung. Am Beispiel einer leichten Mischung (Rezeptur III) mit einem Speichergranulatanteil von 18 Masse-Prozent und einer schwereren Rezeptur (Rezeptur VI) mit 24 Masse-Prozent Speichergranulatanteil erfolgt im Sonnensimulator eine Überprüfung der Labormessungen (Schmelzenthalpie  $H_s$ ).

Abb. 7.51 Vergleich der ermittelten Rohdichtewerte  $\rho$  der untersuchten Holzleichtbetonproben mit Latentwärmespeichermaterialien



Bei dem Vergleich der Rohdichtewerte zwischen den gemessenen Werten an der MPA Bau der Technischen Universität München und den Daten der Probenuntersuchungen beim ZAE Bayern in Würzburg sind bei einzelnen Probemustern zum Teil deutliche Abweichungen festzustellen. Im Mittel beträgt die Differenz etwa 6,5 %, wobei gerade bei den beiden leichtesten Mischungen Unterschiede bis zu 10 % auftreten. (Abb. 7.51) Dies ist vor allem auf die unterschiedlichen Probekörper beziehungsweise Materialeinwaagen zurück zu führen. Diese sind beim ZAE Bayern mit Werten zwischen 9 und 12 mg besonders leicht, so dass eine gewisse Fehlerquote nicht zu vermeiden ist. Bezüglich der Messergebnisse sind diese Abweichungen vernachlässigbar. In den Diagrammen werden den bauphysikalischen Kenndaten stets die höheren, von der MPA Bau ermittelten Werte zugrunde gelegt.

### 7.7.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeitswerte der jeweiligen Rezepturen werden mit der dynamischen Hitzedrahtmethode ermittelt.<sup>68</sup> Bei dieser Meßapparatur befindet sich zwischen zwei aufeinander gepressten, identischen Probestücken ein Hitzedraht. Dieser eingelegte Draht aus Platin mit einem Durchmesser von 100 µm, dient gleichzeitig als "Heizelement und Temperatursensor". (Abb. 5.8+7.52) Während des Messvorgangs wird der "Draht mit einer konstanten elektrischen Leistung beheizt. Die zeitliche Entwicklung der mittleren Temperatur des Hitzedrahts lässt sich anhand des temperaturabhängigen Drahtwiderstands erfassen. Dieser Temperaturverlauf hängt von der Wärmeleitfähigkeit der Probe ab. Die Wärmeleitfähigkeit der Probe wird durch Anpassung einer analytischen Lösung der Wärmeleitungsgleichung an diesen zeitabhängigen Temperaturverlauf unter Berücksichti-

gung des thermischen Kontaktwiderstandes zwischen Probe und Draht sowie von Wärmeverlusten in axialer Richtung ermittelt. [...] Bei einer Temperatur von 25 °C werden an jeder Probe mindestens 10 Einzelmessungen durchgeführt. Die resultierenden zeitlichen Temperaturanstiege werden anschließend gemittelt und die gemittelte Kurve zur Auswertung herangezogen."<sup>69</sup>

Vergleicht man die gemessenen Werte mit denen der früher durchgeführten Vermessung des 'reinen' Holzleichtbetons, ist eine weitgehend identische Entwicklung festzustellen: Mit steigender Rohdichte (etwa 3 bis 5 %) nimmt auch die Wärmeleitfähigkeit zu.

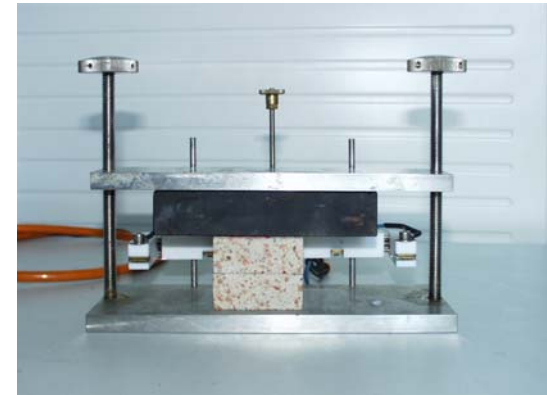
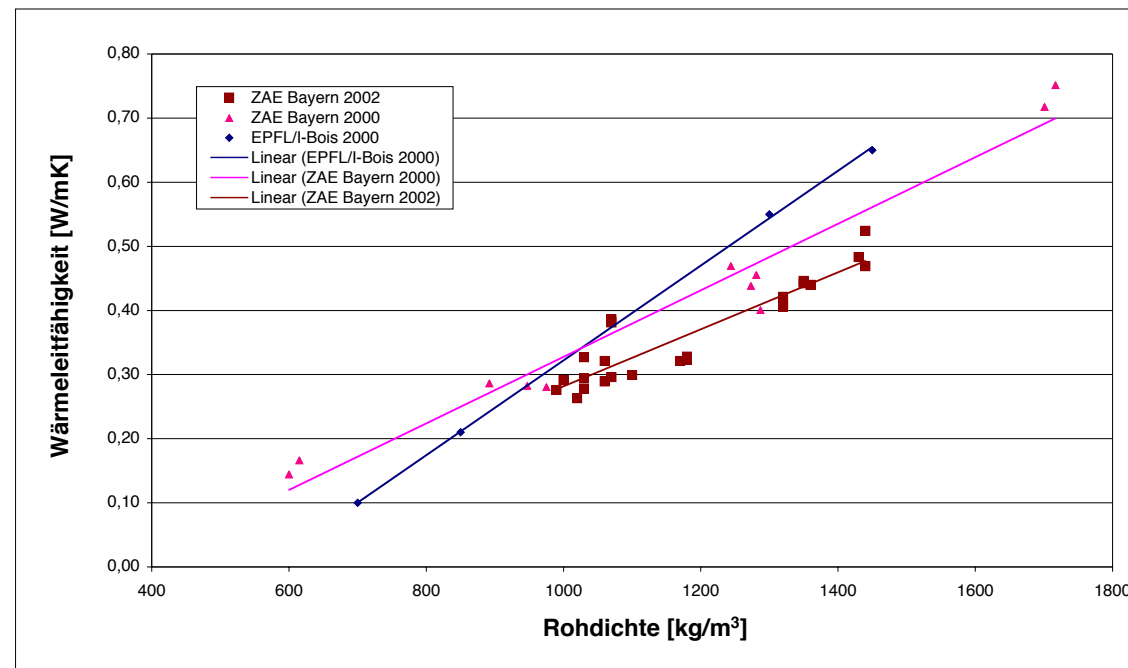


Abb. 7.52 Hitzedrahtapparatur zur Messung der Wärmeleitfähigkeit. Der Draht befindet sich zwischen den beiden Proben.

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

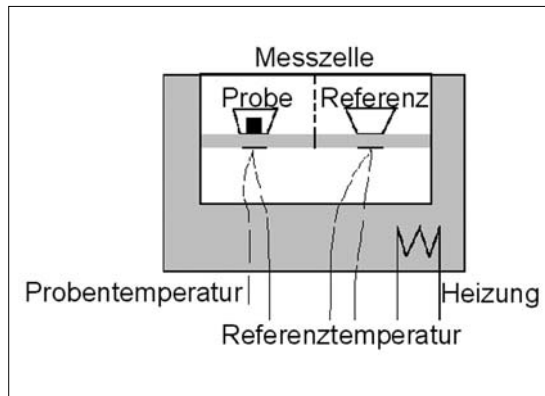
Bauphysikalische Eigenschaften

Abb. 7.53 Vergleich der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von Holzleichtbeton (EPFL/I-Bois 2000; ZAE Bayern 2000) und Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien (ZAE Bayern 2002)



Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Bauphysikalische  
Eigenschaften



Allerdings bleiben die  $\lambda$ -Werte durchgängig fast 10 bis 15 % darunter, obwohl das Speichergranulat gegenüber dem Nadelholz ein höheres  $\lambda$  (0,15 statt 0,10 bis 0,12 W/mK) aufweist. Somit spiegelt sich das dreimal schwerere spezifische Gewicht nicht in erhöhten Wärmeleitfähigkeitswerten wider.

Bei Rohdichten zwischen 1000 (900) kg/m<sup>3</sup> und 1175 (1120) kg/m<sup>3</sup> liegen die  $\lambda$ -Mittelwerte der untersuchten leichteren Rezepturen zwischen 0,285 und 0,363 W/mK. Insgesamt ist bei diesen Mischungen noch eine deutliche Streuung der einzelnen Messwerte festzustellen. Auffallend hoch sind zwei Spitzenwerte der Rezeptur IV, die trotz des geringeren Paraffinanteils mit 0,381 beziehungsweise 0,386 W/mK etwa 15 % über den Werten der Rezeptur V liegen.

Mit Rohdichten zwischen etwa 1320 (1240) kg/m<sup>3</sup> und 1450 (1400) kg/m<sup>3</sup> erreichen die Mischungen mit dem höheren Zementanteil  $\lambda$ -Mittelwerte von 0,412 bis 0,492 W/mK. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang sind die viel gleichmäßigeren Werte; möglicherweise führt der Zementanteil zu einer größeren Stabilität der Rezepturen. (Abb. 7.53)

### 7.7.2 Wärmespeicherkapazität und Schmelzenthalpie

Die Ermittlung der Wärmespeicherkapazität von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien erfolgt ebenfalls analog der

Abb. 7.54 Prinzip der Dynamischen Differenz Kalorimetrie (DDK)

Abb. 7.55 Blick in das geöffnete Temperaturmodulierte Dynamische Differenz Kalorimeter (TDDK) mit den Aluminium-Tiegeln

Abb. 7.56 Gesamtansicht des TDDK

Messungen zu Holzleichtbeton mit dem selben Versuchsaufbau.<sup>70</sup>

Bei dem Messverfahren, TDDK (Temperaturmodulierte Dynamische Differenz Kalorimetrie), "wird der Differenz-Wärmestrom zwischen der Probe und einer Referenz als Funktion der Zeit und Temperatur bestimmt." Die Holzleichtbetonprobe befindet sich in einer Messzelle, (Abb. 7.54) die gleichmäßig aufgeheizt wird. Aus dem Differenz-Wärmestrom zwischen beiden kann auf die spezifische Wärmekapazität geschlossen werden. "Mittels der TDDK lassen sich auch quasi-isotherme DDK-Messungen durchführen. Hier kann zum Beispiel die zeitliche Veränderung der spezifische Wärmekapazität einer Probe unter quasi-isothermen Bedingungen verfolgt werden, wenn sich diese durch physikalische Umwandlungen oder chemischen Reaktionen zeitlich verändert."<sup>71</sup>

Zur Durchführung der Messungen werden die Holzleichtbetonproben zermörsert und in einen Aluminium-Tiegel eingefüllt, der sich in der Messzelle des TDDK befindet. (Abb. 7.55 +7.56) Die Messungen erfolgen unter einer dynamischen Stickstoffatmosphäre.

Exemplarisch ist eine Messung anhand der Probe VII/1 in der Grafik von Abb. 7.57 gezeigt. "Die Heizrate beträgt 2 K · min<sup>-1</sup>. Die Temperaturerhöhung ist [...] als Funktion der Aufheizzeit zu sehen (gestrichelte Linie). Zusätzlich ist [...] der Differenz-Wärmestrom als Funktion der Aufheizzeit dargestellt (durchgezogene Linie)."

Mit dem Quotienten des Differenz-Wärmestroms  $Q$  [W · g<sup>-1</sup>] und der Heizrate kann die spezifische Wärmekapazität ermittelt werden.

Vergleicht man die spezifische Wärmekapazität von Holzleichtbeton ohne und mit Latentwärmespeichermaterialien kann vereinfachend gesagt werden, dass innerhalb der bei-



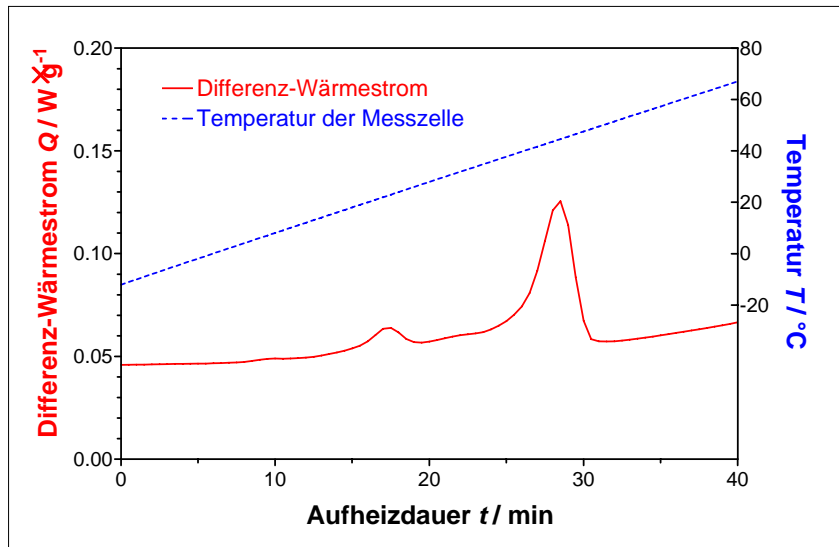


Abb. 7.57 Der Differenz-Wärmestrom  $Q$  und die Temperatur der Messzelle  $T$  in Abhängigkeit von der Aufheizdauer  $t$  für die Probe VI/1

Abb. 7.59 Schmelzenthalpie  $H_s$  der Holzleichtbetonproben in Abhängigkeit des Anteils  $X_{PCM}$  des beigemischten Granulats GR 41 (Rezepturen I bis V) bzw. GR 54 (Rezepturen VI und VIII). Die Schmelzenthalpie des reinen *RUBITHERM* Granulats beträgt  $63 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$

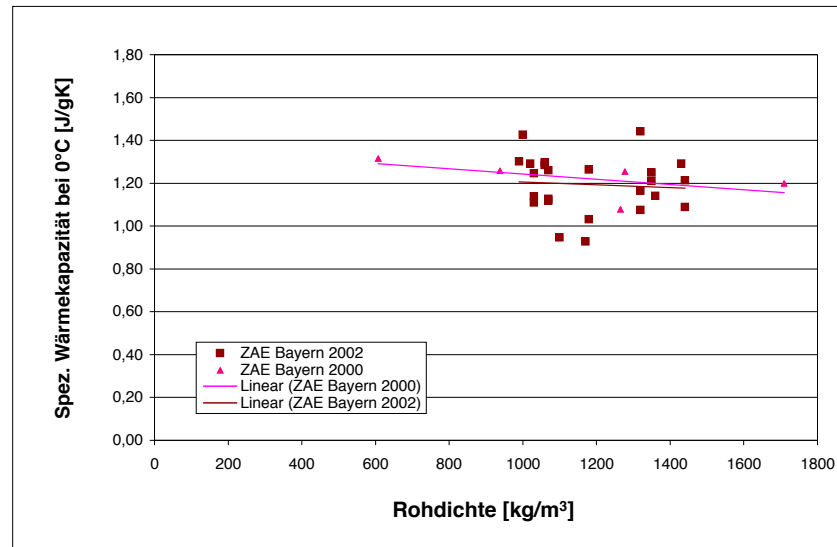
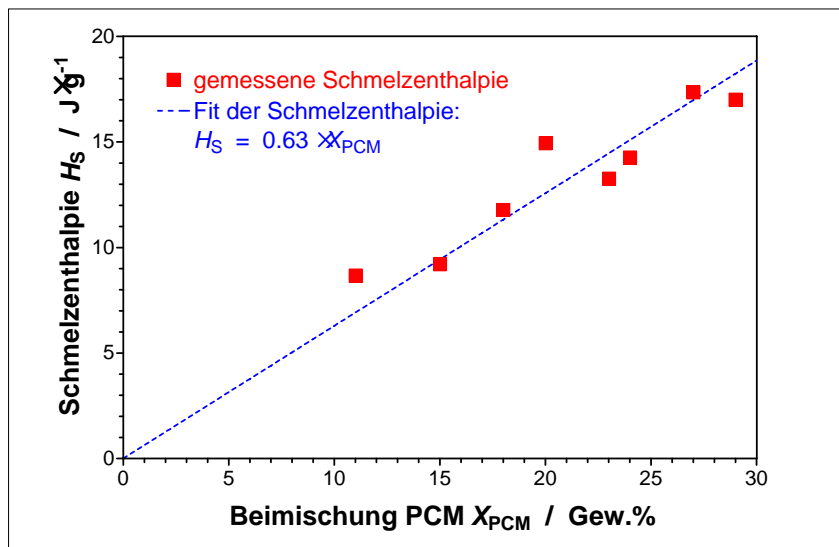


Abb. 7.58 Vergleich der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  bei  $0^\circ$  von Holzleichtbeton (ZAE Bayern 2000) und Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien (ZAE Bayern 2002)

den Rezepturklassen, jeweils mit Zunahme der Rohdichte eine Abnahme der Werte festzustellen ist. Diese fällt bei Betrachtung der gemittelten Werte bei den leichten Mischung etwas deutlicher aus. Dies lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass der Holz-Anteil bei ansteigender Dichte geringer ist. Insgesamt ist eine große Streuung bei den Messergebnissen zu verzeichnen, die vor allem auf lokale Rohdichteschwankungen bei den relativ kleinen Proben und auf Einflüsse bei der Probenpräparierung zurückzuführen ist. (Abb. 7.58)

Die Schmelzenthalpie, das heißt die Energiemenge die einem Stoff zugeführt werden muss um den Phasenübergang von fest zu flüssig herbeizuführen, entspricht der Fläche unter den beiden Peaks des Differenz-Wär-

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Bauphysikalische  
Eigenschaften

Probe	PCM Masse- anteil	Rohdichte (MPA) $\rho$	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda$	Spezifische Wärme- kapazität $c_p 0^\circ$	Spezifische Wärme- kapazität $c_p 55^\circ$	Schmelz- enthalpie $H_s$
	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/gK]	[J/gK]	[J/g]
R I	11	1.029	0,285	1,34	1,57	8,67
R II	15	1.079	0,286	1,17	1,39	9,21
R III	18	1.039	0,300	1,16	1,37	11,78
R IV	20	1.069	0,363	1,18	1,43	14,27
R V	23	1.166	0,324	1,07	1,29	13,26
R VI	24	1.304	0,412	1,23	1,47	14,94
R VII	27	1.348	0,443	1,20	1,45	17,35
R VIII	29	1.419	0,492	1,20	1,50	17,01

Abb. 7.60 Gemittelte Rohdichtewerte  $\rho$  (MPA Bau/TU München) sowie der untersuchten bauphysikalischen Parameter von Holzleichtbetonproben mit Latentwärmespeichermaterialien

mestroms. "Als Basislinie wird dabei die näherungsweise lineare Verbindung zwischen 0 °C und 55 °C gewählt. Zwischen 0 °C und 55 °C ist keine Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität möglich, da sie in diesem Bereich von der Schmelzenthalpie überlagert wird."<sup>72</sup>

Zur Verifizierung der Messungen wird "die Schmelzenthalpie als Funktion des Anteils  $X_{PCM}$ " der beigemischten Speichergranulate *RUBITHERM GR 41* (Rezepturen I bis VII) beziehungsweise *GR 54* (Rezeptur VIII) dargestellt.

"Die Werte werden durch einen linearen Fit angenähert, der durch den Koordinatennullpunkt geht, da die Schmelzenthalpie Null sein muss, falls dem Holzleichtbeton kein Paraffin beigemischt ist. Als Ergebnis erhält man eine Gerade mit der Steigung 0,63 (gestrichelte Linie)." Bei einem Granulatanteil von 100 % re-

sultiert daraus eine Schmelzenthalpie von 63 J/g, ein Wert, der sich mit den Herstellerangaben für 'reines' *RUBITHERM-PCM*-Material deckt.<sup>73</sup> (Abb. 7.59)

### 7.7.3 Messungen mit dem Sonnensimulator

Zusätzlich zur Bestimmung von bauphysikalischen Kennwerten im Labor soll im Rahmen der Versuchsarbeiten das thermische Verhalten von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien experimentell untersucht werden. Ziel ist dabei vor allem die Überprüfung der Schmelzenthalpiewerte anhand der beiden Musterplatten unter möglichst realitätsnahen Bedingungen. Für die angestrebte Potenzialabschätzung stellt die Schmelzenthalpie  $H_s$  eine entscheidende Größe dar. Das ZAE Bayern verfügt in Würzburg über einen so genannten Sonnensimulator, einen

Teststand, in dem Proben mit einer Lichtquelle bestrahlt werden können, deren Spektrum in etwa dem der Solarstrahlung auf der Erdoberfläche entspricht; im eingeschalteten Zustand erreicht die Bestrahlungsstärke der Lampe etwa 700 W/m<sup>2</sup>.

Die Abmessungen des Probenhalters betragen 70 x 70 cm und die der homogen bestrahlten Fläche 50 x 50 cm.

Die (Außen-)Lufttemperatur in der 'Kuppel' sowie die Temperatur in der Messbox werden jeweils von einem Thermostaten auf den konstanten Werten  $T_a$  beziehungsweise  $T_i$  gehalten. Zur Messung wird anstelle der Öffnung das Plattenmuster in den Probenhalter eingebaut. Der vordere Bereich des Sonnensimulators ist mit Weißglas 'eingehaust', das einen weitgehend ungefilterten Strahlungsdurchgang ermöglicht.<sup>74</sup> (Abb. 7.61)

Nach Einbau der Musterplatten in den Probenhalter werden die Temperaturen  $T_a$  beziehungsweise  $T_i$  auf die voreingestellten Werte eingeregelt und bei ausgeschalteter Lampe abgewartet, bis sich ein Temperaturgleichgewicht einstellt. Nach dem Einschalten der Lichtquelle erfolgt die Durchführung der Messung bis sich wieder ein Temperatur-Gleichgewicht einstellt. Nach dem Abschalten der Lichtquelle ermittelt man zusätzlich das Abkühlverhalten.

Die Untersuchungen im Sonnensimulator erfolgen mit je einer Musterplatte der Rezepturen III und VI. Neben dem Wärmestrom durch die Probe werden die Temperaturen auf der Probenvorder- und Probenrückseite sowie an drei Stellen innerhalb der Probe (Sensor 1 bis 3) erfasst; desweiteren wird die Strahlungsintensität der Lichtquelle gemessen.<sup>75</sup> (Abb. 7.62+7.63)

"Bei ausgeschalteter Lampe tritt ein Wärmefluss von der Rück- zur Vorderseite hin auf (hier positiv gewählt), da die Rückseite auf ei-

ner höheren Temperatur gehalten wird als die Vorderseite.<sup>76</sup> Nach dem Einschalten der Lampe kehrt sich dieser um (in der graphischen Darstellung negativ gewählt). (Abb. 7.64)

Betrachtet man den Temperaturverlauf auf und innerhalb der Musterplatte VI nach dem Einschalten der Lichtquelle ist eine leichte Verzögerung der Temperaturzunahme innerhalb der Probe zu erkennen, die mit einer Verzögerung bei der Abnahme des Wärmeflusses in Abb. 7.65 übereinstimmt.

“Im stationären Fall, ohne Wärmequellen oder Wärmesenken innerhalb der Probe gilt die folgende Wärmeleitungsgleichung:

$$q = - \frac{\lambda}{d} (T_2 - T_1)$$

wobei  $d$  den Abstand zwischen den Temperatursensoren angibt.

Berechnet man nun den Wärmestrom durch die Probe VI mit dieser Gleichung, so weicht dieser Wert teilweise vom [...] mit dem Wärmeflussmesser ermittelten Wert ab. Die Abweichung ist durch eine Wärmesenke beziehungsweise Wärmequelle innerhalb der Holzleichtbetonprobe zu erklären. Für den Aufschmelzvorgang des im Holzleichtbeton enthaltenen PCM ist Energie notwendig, die der Umgebung entzogen wird (Wärmesenke). Deshalb ist der gemessene Wärmefluss (durchgezogene Linie) geringer als der berechnete (gestrichelte Linie).” Ist das gesamte PCM aufgeschmolzen beziehungsweise erstarrt, sind der gemessene und der berechnete Wärmefluss identisch. Beim Erstarren des PCM wird schließlich Energie freigesetzt, was zu einer Wärmequelle führt. (Abb. 7.65) Zur Bestimmung der Schmelzenthalpie  $H_s$  der Holzleichtbetonprobe wird die Fläche zwi-

schen den beiden Kurven berechnet. “Für den Aufschmelzvorgang ergibt sich eine Schmelzenthalpie von 13,26 J/g und für den Erstarungsvorgang 13,44 J/g. Mit der DDK-Messung wird die Schmelzenthalpie an drei Proben der Rezeptur VI untersucht. Die Werte betragen  $H_s = 15,382, 12,695$  und  $14,472$  J/g. Somit ist eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen mit dem DDK und dem Sonnensimulator zu erkennen.<sup>77</sup> Ein ähnliches Ergebnis erhält man für die Messung der Musterplatte aus Rezeptur III.

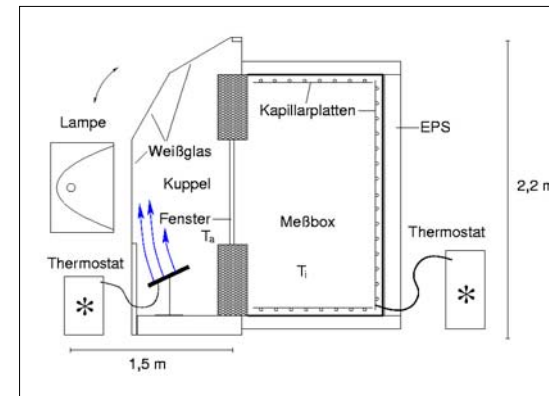
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die vorliegenden Kenndaten zum thermischen Verhalten weitgehend die erste Einschätzung zu Holzleichtbeton ohne Latentwärmespeichermaterialien bestätigen.

Bei der Wärmeleitfähigkeit wird anhand der umfangreichen Messungen sichtbar, dass aufgrund des gegenüber Holz schwereren PCM-Materials, bei Rohdichten von 1000 bis 1400 kg/m<sup>3</sup>, die  $\lambda$ -Werte im Bereich zwischen 0,30 und 0,50 W/mK liegen. Damit schneidet das Kompositmaterial im Vergleich mit Leichtbetonen (mit Quarz- oder Leichtsand) besser

Abb. 7.61 Schematische Darstellung des Sonnensimulators

Abb. 7.62 In den Sonnensimulator eingebaute Holzleichtbetonprobe. Davor in Bildmitte ist ein Solarimeter zu erkennen, das die auf die Probe einfallende Strahlungsinintensität mißt

Abb. 7.63 Lichtquelle des Sonnensimulators, die die Probe bestrahlt. Die Vorderseite des Teststands ist mit Weißglas bekleidet, um einen möglichst guten Strahlungsdurchgang zu gewährleisten



Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Bauphysikalische Eigenschaften

Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Bauphysikalische  
Eigenschaften

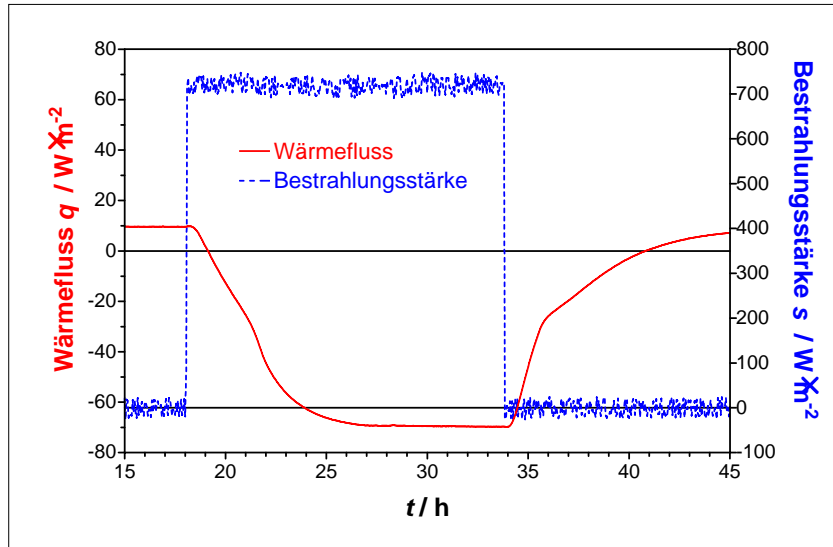
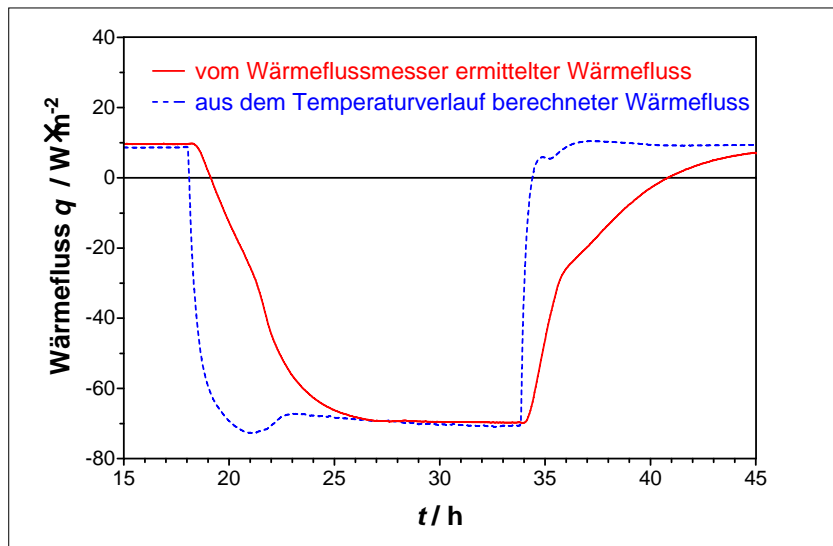


Abb. 7.64 Wärmefluss  $q$  und Bestrahlungsstärke  $s$  bei Vermessung der Probe VI in Abhängigkeit von der Zeit  $t$ .

Abb. 7.65 Gemessener (durchgezogene Linie) und berechneter (gestrichelte Linie) Wärmefluss durch die Probe VI. Aus der Fläche zwischen den beiden Kurven beim Aufschmelz- und beim Erstarrungsprozess lässt sich jeweils die Schmelzenthalpie bestimmen



ab. Allerdings fällt auf, dass die Wärmeleitfähigkeitswerte der Rezeptur VIII etwa um 15 % und bei der Rezeptur V um 20 % gegenüber der Holzbetonausgangsmischung niedriger sind.

Dies obwohl beide Mischungen in den jeweiligen Messreihen den höchsten Speichergranulatanteil aufweisen.

Betrachtet man die Ergebnisse zur spezifischen Wärmespeicherkapazität, zeigen sich im Vergleich der gemittelten Werte vor allem bei den leichteren Mischungen Abweichungen gegenüber den Messungen von 2000 im Bereich von +/- 7 %. Auch hier ist der  $c_p$ -Wert der Rezeptur V etwa 15 % niedriger.

Auch die Validierung der Schmelzenthalpie des PCM in den Holzleichtbetonproben und den Musterplatten ergibt eine gute Übereinstimmung von gemessenen und gerechneten Werten.

Die guten thermischen Eigenschaften von Holzleichtbeton werden insgesamt auch in der Kombination mit Latentwärmespeichermaterialien bestätigt. Indes ist aufgrund der höheren Rohdichten die wärmedämmende Funktion begrenzt.

Somit liegen grundlegende Kennwerte vor, die als Grundlage für eine Potenzialabschätzung von Holzleichtbeton mit PCM dienen.

## 7.8 Ergänzende Untersuchungen

In Anknüpfung an die dargestellten grundlegenden materialspezifischen Untersuchungen werden weitere wichtige Eigenschaften von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien – als Material für Bauteile im Bereich von Gebäudefassaden – ermittelt. Diese Arbeiten beschäftigen sich ergänzend mit zwei Parametern zum Materialverhalten beziehungsweise Gefügebau. Damit eng verknüpft, sind Anforderungen an die Dauerhaftigkeit des Materials. Fragen zum Brandverhalten sowie Aspekte des Feuchteausgleichsverhalten vervollständigen diese exemplarisch durchgeführten Prüfungen.<sup>78</sup>

### 7.8.1 Schwind-Messungen

Als Schwinden wird eine lastunabhängige Verformung des Betons beim Austrocknungsprozess und dem damit einhergehenden Abklingen der Hydratationstemperatur bezeichnet. Wesentlichen Einfluss auf das Schwindverhalten nimmt neben der Zusammensetzung, insbesondere Zementart und -festigkeitsklasse, vor allem der W/Z-Wert. Für ein geringes Schwindmaß sollte dieser niedrig ausfallen.<sup>79</sup> Besonders für die Maßhaltigkeit von Fertigteilen stellt das Schwindverhalten des Betons eine wichtige Kenngröße dar.

Bereits im Zusammenhang mit der Betonage 1 erfolgten Messungen zum Masseverlust von Holzleichtbeton, bei denen aufgrund des hohen Feuchtegehaltes ein hohes Schwindverhalten des Materials erwartet werden musste. In Ergänzung zu den Festigkeitsuntersuchungen der Betonage 2 werden in drei Schritten Schwind-Messungen an sechs unterschiedlichen Mischungen durchgeführt. Ziel ist an ausgewählten Rezepturen einer-

seits eine Einschätzung der Holzleichtbeton-Ausgangs-Mischung zu erhalten und andererseits den Einfluss des PCM-Materials sowie der Additive Farbe und Fließmittel aufzuzeigen.

Im Rahmen der Betonage 3<sup>80</sup> werden aus den Mischungen:

- HLB+PCM (R VI) = Holzleichtbeton der schweren Mischung mit PCM-Material
  - HLB (R VI) Rot 8 % = Holzleichtbeton der schweren Mischung mit 8 % Farbzusatz
  - HLB (R III) Gelb 8 % = Holzleichtbeton der leichteren Mischung mit 8 % Farbzusatz
- jeweils drei kleinformatige Prismen, mit den Abmessungen 40 x 40 x 160 mm, mit Frischbeton befüllt, verdichtet und in einer Klimakammer<sup>81</sup> gelagert. (Abb. 7.66+7.67) Mit Hilfe eines Messgerätes wird nach dem Ausschalen täglich das Längenmaß der Prüfkörper ermittelt. (Abb. 7.68) Innerhalb von 28 Tagen erfolgt jeweils an den Arbeitstagen eine Messung der Prismen.

In zwei ergänzenden Betonagen (4+5<sup>82</sup>) werden Prüfkörper zu den Mischungen

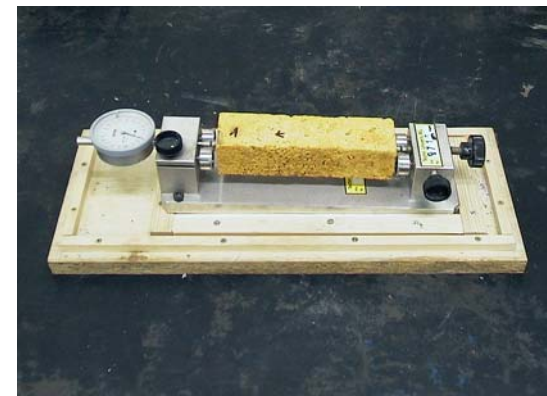
- Holzleichtbeton (600) = leichte Ausgangsmischung ( $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ )
- HLB+PCM (R III) = Holzleichtbeton der leichten Mischung mit PCM-Material
- HLB (600) + FM = Holzleichtbeton der leichten Mischung mit 1 % Fließmittel hergestellt.

Hinsichtlich der Abweichungen in den Resultaten muss bei der Interpretation die zeitlich

Abb. 7.66 Prismenschalform auf Rütteltisch

Abb. 7.67 Prismen für Schwindmessungen mit aufgeklebten Messköpfen

Abb. 7.68 Messeinrichtung

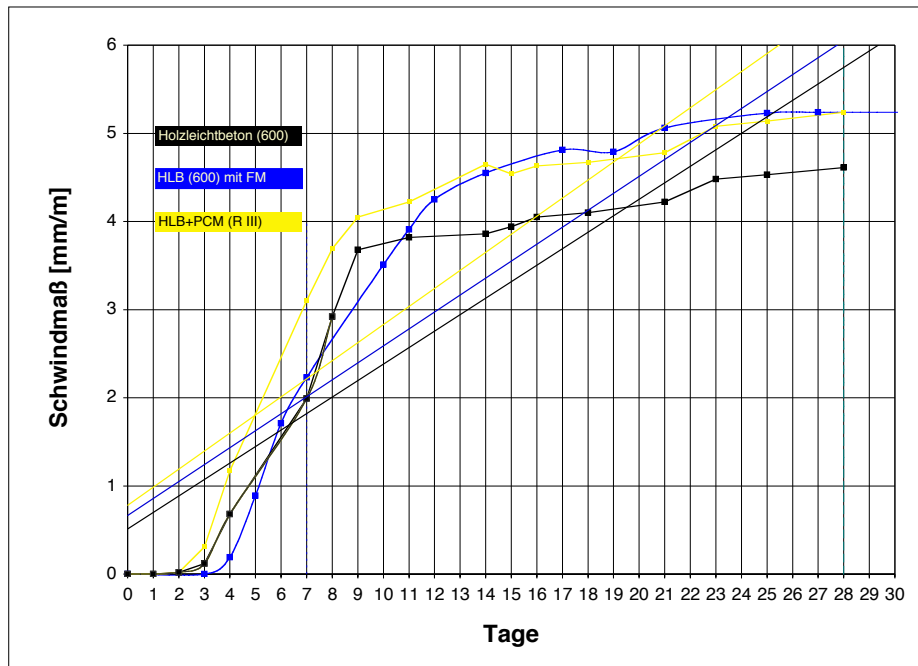
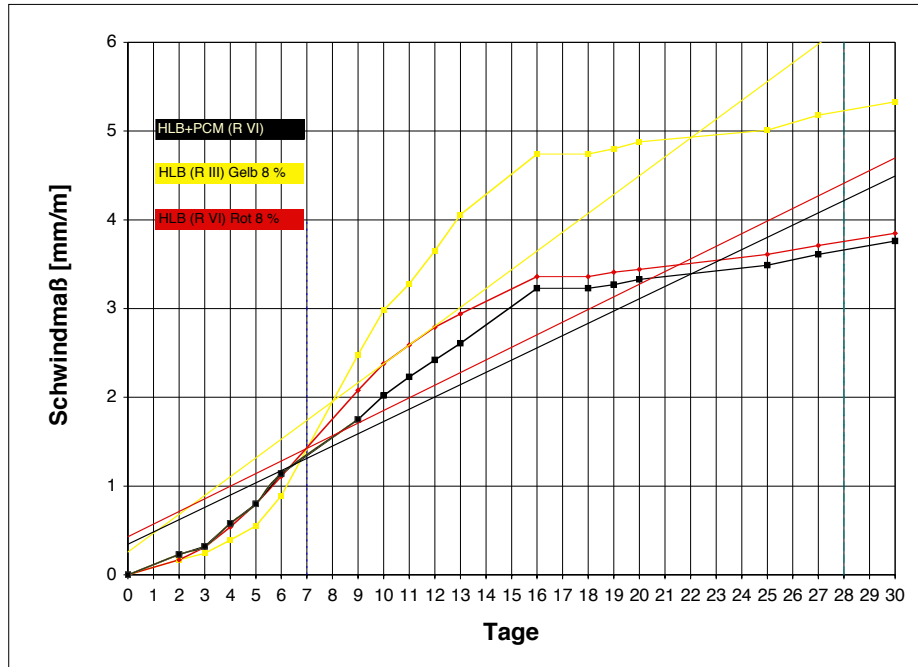


Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Ergänzende  
Untersuchungen

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Ergänzende  
Untersuchungen



zum Teil ein halbes Jahr auseinander liegen-  
de Herstellungszeit der Probekörper berück-  
sichtigt werden.

Betrachtet man die ersten Schwindmessun-  
gen kann man beim Verlauf drei Phasen un-  
terscheiden. Während bis zum dritten Tag ein  
gleichmäßiger Anstieg bei allen Proben fest-  
zustellen ist, steigt bis kurz vor Ablauf der er-  
sten Woche das Schwindmaß der schweren  
Mischungen steiler, aber gleichmäßig an. Da-  
gegen verläuft dieser Prozess bei der leichten  
farbigen Mischung zunächst langsamer, ver-  
stärkt sich aber nach fünf Tagen.

Nach einer Woche zeigen sich deutlich Un-  
terschiede im Austrocknungsverhalten. Bis zum  
16 Tag nimmt das Schwindmaß bei allen Prob-  
ekörpern stark zu, beim schweren Holz-  
leichtbeton um den Faktor 3, wobei die Farb-  
beimischung zu etwas höheren Werten führt,  
und bei dem leichten Holzleichtbeton mit ge-  
mittelten 4,74 mm pro Meter weit über den  
Faktor 5.

Danach verlangsamt sich die Trocknung deut-  
lich, verläuft bei allen Mischungen etwa paral-  
lel; dabei nimmt das Schwindmaß jeweils um  
10 % zu. Ähnlich wie bei den Meßreihen zum  
Masseverlust von Prüfkörpern der Betonage 1  
ist dieser Prozess nach 28 Tagen keineswegs  
abgeschlossen. Auch für die folgenden Tage  
ist ein Ansteigen der Kurve um weitere 3 bis  
4 % festzustellen. (Abb. 7.69)

Abb. 7.69 Schwindmessung von unterschiedlichen  
Holzleichtbeton-Proben (MPA Bau/TU  
München, 10.01.2003)

Abb. 7.70 Ergänzende Schwindmessung von  
Holzleichtbeton-Proben (MPA Bau/TU  
München, 03.07.2003 bzw. 16.07.2003  
«HLB (600) mit FM»)

Damit wird zunächst deutlich dass die schwerere Mischung mit höherem Zementanteil und damit niedrigerem W/Z-Wert ein kleineres Schwindmaß aufweist. Insgesamt ist bei der Betonage 3 festzustellen, dass sowohl bei Rezeptur III als auch bei Rezeptur VI aufgrund des niedrigen Holzfeuchtegehalts der W/Z-Wert um etwa 80 % höher ist. Zwischen beiden Mischungen weist der W/Z-Wert bei Betonage 2 und bei Betonage 3 eine Differenz um den Faktor 1,6 auf. Somit spiegelt das um etwa 40 % höhere Schwindmaß zwischen der leichten und den beiden schweren HLB-Mischungen näherungsweise die Unterschiede aus der Zusammensetzung und den Frischbetonwerten.

Der Wert bei der farbigen Mischung fällt gegenüber dem 'Ausgangsmaterial' um etwa 3 % höher aus, was auch auf das flüssige Aditiv zurückgeführt werden kann.

Insgesamt muss festgestellt werden, dass Schwindmaße zwischen 3,7 und 5,2 mm/m noch recht hoch für baupraktische Anwendungen sind, allerdings innerhalb des Toleranzbereichs im 'klassischen' Betonbau liegen.

In einer weiteren Messreihe kann anhand der leichteren Holzleichtbeton-Ausgangsmischung der Einfluss des PCM-Materials sowie des Fließmittels (FM)<sup>83</sup> auf das Schwindverhalten gezeigt werden.

Gegenüber den vorgenannten Ergebnissen zeigen sich im Kurvenverlauf markante Unterschiede. Die beiden Vergleichsmischungen (HLB + FM und HLB + PCM / R III) liegen quantitativ (5,18/5,24 mm/m) ziemlich nah bei einander; die Zugabe des Fließmittels führt zu einem leicht niedrigeren Wert. Alle drei Mischungen verzeichnen zwischen dem dritten und sechsten Tag eine äußerst starke Zunahme des Schwindmaßes. Interessant dabei ist, dass mit dem Fließmittelzusatz der Anstieg sich erst nach 2 Wochen verlangsamt.

Da diese Rezeptur mit 0,35 den niedrigsten W/Z-Wert aller Mischungen aufweist (Konsistenzbereich C1/F1), überrascht das hohe Schwindmaß. Das Fließmittel scheint jedoch das Schwindverhalten nach vier Wochen zu beenden, während der Kurvenverlauf bei den anderen beiden Proben darüber hinaus noch einen schwachen Anstieg zeigt.

Im Vergleich von Holzleichtbeton ohne und mit PCM schneidet die Ausgangsmischung mit 4,61 zu 5,24 mm/m etwa 10 % günstiger ab. Das liegt wohl in dem gebundenen PCM-Material begründet, das zusätzlich noch Feuchte einlagern kann. (Abb. 7.70)

Somit bestätigen sich die ersten Einschätzungen: Mit dem Latentwärmespeichermaterial nimmt das Schwindverhalten zu, während ein nachteiliger Einfluss der Flüssigfarbe nicht gegeben scheint. Ferner zeigen alle Proben ohne Fließmittel, dass der Trocknungsprozess nach 28 Tagen noch nicht abgeschlossen ist. Mögliche Optimierungsschritte sind in mehrfacher Hinsicht gegeben:

- Vorbehandlung des Holzzuschlags
- Verwendung anderer Zementarten
- Einsatz von Fließmitteln

### 7.8.2 Luftporengehalt

Wie bereits beschrieben, wurde während der Betonage 2 mit dem Luftgehalt-Prüfgerät der Luftgehalt bestimmt, der als Hinweis für den Verdichtungsgrad und somit für den Gehalt an Luftporen im Frischbeton gilt.

Die Druckfestigkeit und den angestrebten Frost- und Tausalz widerstand beeinflusst der Luftgehalt. Fällt dieser zu hoch aus, sinkt die Festigkeit, wird dieser unterschritten, mindert dies die angestrebte Widerstandsfähigkeit.

„Auch ein optimal verdichteter Beton enthält noch einen restlichen Luftgehalt von rund 1 bis 2 Volumen-Prozent.“ Bei Verwendung eines Luftporenbildners kann dieser auf rund

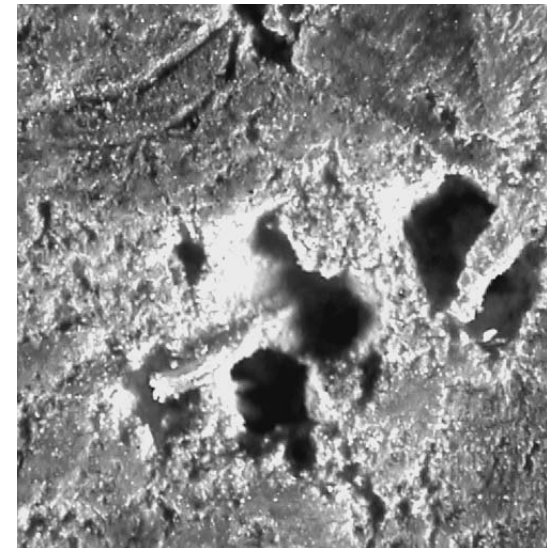
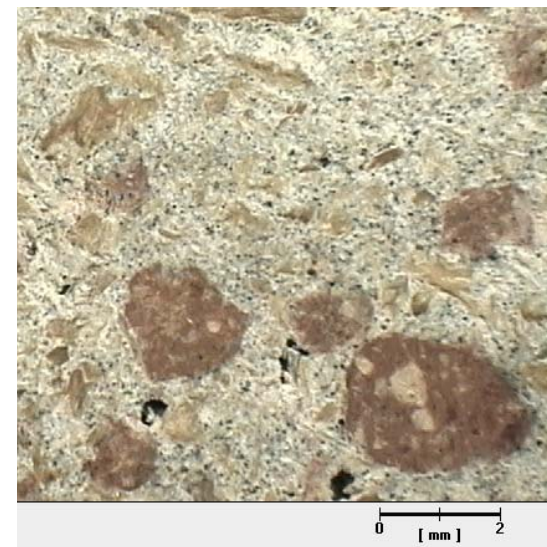


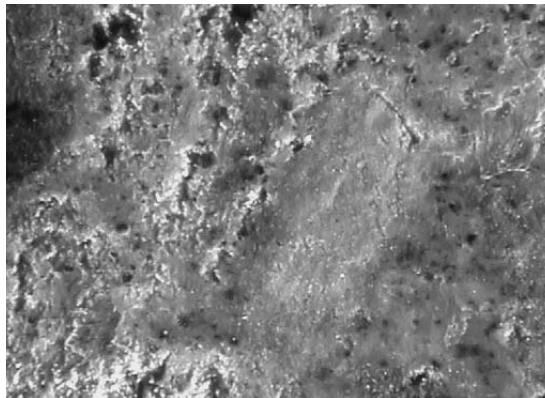
Abb. 7.71 Aufnahme unter dem Mikroskop der Rezeptur III (Vergrößerung  $\approx 20:1$ )

Abb. 7.72 Rezeptur III/5 (Darstellung  $\approx 8:1$ )



Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Ergänzende  
Untersuchungen



“4 Volumen-Prozent gesteigert (für Beton mit hohem Frost- und Tausalzstand)” werden.<sup>84</sup>

Die bewusste Einbringung von Luft in das Betongefüge (Porenbeton) wird darüber hinaus zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften genutzt und ermöglicht zudem eine starke Gewichtsreduzierung.

Betrachtet man die Luftgehalte der hergestellten Holzleichtbetonmischungen mit Speichergranulat, zeigt sich bei den Rezepturen I bis V ein deutlich höherer Anteil an Luftporen (zwischen 13 und 20 %), während dieser bei den schweren Mischungen zwischen knapp 5 und 13 % beträgt. Der niedrige Wert von Rezeptur VIII ist auch maßgeblich auf das eingesetzte pulverförmige PCM-Material zurückzuführen. (Abb. 7.73)

Die daraus resultierenden Einflüsse auf die Oberflächen lassen sich im Vergleich zweier Probestücke verdeutlichen. Bei der photographischen Vergrößerung unter dem Mikroskop ist bei der Rezeptur III (Luftporengehalt 17 %) die offenporige Struktur gut zu sehen, mit Poren zwischen 0,5 und 1 mm Größe. (Abb. 7.71+7.72) Demgegenüber zeigt die Rezeptur VI (Luftporengehalt 13 %) aufgrund des höheren Zementanteils eine geschlossener Oberfläche. (Abb. 7.74+7.75) Allerdings sind mit Holzleichtbeton auch bei sehr niedrigem Luftporengehalt (5,6 %/Rezeptur VIII) ganz geschlossene, gefügedichte Strukturen nicht zu erzielen.

Abb. 7.74 Aufnahme unter dem Mikroskop der Rezeptur VI (Vergrößerung  $\approx$  20:1)

Abb. 7.75 Rezeptur VI/2 (Darstellung  $\approx$  5:1)

Abb. 7.76 Rezeptur VIII/1 (Darstellung  $\approx$  5:1)

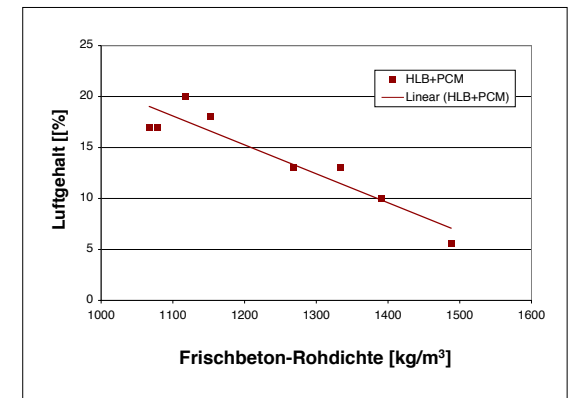


Abb. 7.73 Luftporengehalt der hergestellten Holzleichtbetonmischungen

Interessant erscheint darüber hinaus der Vergleich des Luftgehalts zwischen Frischbeton und Festbeton. Beim Materialprüfungsamt für das Bauwesen (MPA Bau) der Technischen Universität München hat man dazu eine Software zur Ermittlung des Porenanteils entwickelt. Zunächst werden bis zu 40 Sektoren der Oberfläche des Probenkörpers in starker Vergrößerung abgescannt. Das Programm identifiziert nun Fehlstellen, berechnet und summiert deren Flächenanteile und setzt diese in Relation zur jeweilig vorab bestimmten Gesamtfläche des Sektors.

Für 4 Mischungen können somit die Luftporengehalte des Festbetons abgeschätzt werden. Diese liegen mit Werten zwischen 2,5 und 5,8 % etwa um den Faktor 2 bis 3 unter denen des Frischbeton-Luftgehalts.

Neben diesen Untersuchungen zum Gefüge des Holzleichtbetons ermöglichen diese Arbeitsschritte auch das Studium der Materialoberflächen hinsichtlich der Verteilung der Zuschlagsstoffe, Größenrelationen etc.

So zeigt sich zum Beispiel, dass die Siebfraktionen des Speichergranulats bei den Rezep-



turen nicht vollständig voneinander getrennt werden konnten. In der Oberfläche einer Rezeptur VIII-Probe sind deutlich sichtbar gröbere 3 mm-Partikel zu erkennen. (Abb. 7.76) Gleichwohl sieht man in den Vergrößerungen bereits eine gute, ausgewogene Verteilung der Zuschlagsstoffe sowohl in Bezug auf die gewählten Korngrößen als auch auf deren Anordnung im Materialgefüge.

### 7.8.3 Frost-Tau-Wechselbeständigkeit

Ein wesentliches Ziel beim Betonbau ist die Schaffung eines äußerst dichten Gefüges sowie einer geringen Porosität der Oberfläche, damit der Beton vor dem Eindringen insbesondere von Wasser geschützt ist. Zum Verarbeiten benötigt man in der Regel mehr Wasser, als für das Erhärten des Zements erforderlich ist. Dieses überschüssige Wasser hinterlässt später im erhärteten Beton ein System haarfeiner Kapillarporen. Das darin enthaltene Wasser dehnt sich beim Gefrieren aus und erzeugt einen starken Druck auf die Porenwandungen, was zu Zerstörungen im Gefügeverbund führen kann.<sup>85</sup>

Der Holzleichtbeton – vor allem die leichteren Mischungen – weist ein sehr poröses Gefüge auf. Demgegenüber erfordert der Einsatz von Beton im Außenbereich von Fassaden für eine ausreichende Widerstandsfähigkeit in der Regel sehr dichte Oberflächen. Die Gewährleistung der Beton-Dauerhaftigkeit erfolgt mittels einer Prüfung am Festbeton durch die Ermittlung der Wassereindringtiefe und der Druckfestigkeit. Allerdings ist eine einheitliche Prüfmethode für jede geforderte Betoneigenschaft aufgrund der vielfältigen Umweltbeanspruchungen nicht gegeben. Zur Prüfung der Widerstandsfähigkeit von Beton sind in den letzten Jahren zwei Prüfmethoden entwickelt worden.<sup>86</sup> Mit diesen kann die besondere Eignung von Beton gegen Frost- und

Frost-Tausalz-Angriffe mit hoher Zuverlässigkeit bestimmt werden.<sup>87</sup>

Für den Holzleichtbeton und dessen Einsatzbereiche stellt die Hauptbeanspruchung die Frost-Tau-Wechselbelastung dar. Daher wird entschieden, die Untersuchungen mit dem CIF-Test<sup>88</sup> durchzuführen, bei dem die innere Schädigung des Betons durch einen definierten Frostangriff bestimmt wird. Mit diesem standardisierten Verfahren wird im Labor “durch Frost-Tau-Wechselbelastung ein Schaden erzeugt, der von der äußeren Materialoberfläche nach innen fortschreitet. Der Abfall von E-Modul und Festigkeit wird als Maß für die Betonschädigung gemessen.”<sup>89</sup> Die Untersuchungen werden am Wilhelm Dyckerhoff Institut für Baustofftechnologie in Wiesbaden durchgeführt.

Dieser CIF-Test erfolgt an jeweils einer Mischung aus jeder Rezepturreihe. Für die erforderlichen 5 Probekörper wird jeweils eine leichtere sowie eine schwerere Mischung gewählt. Der Holzleichtbeton der Rezeptur III weist mit 14 % Holz- und 18 % PCM-Masseanteil einen mittleren Wert auf, Rezeptur VI wird dagegen gewählt, weil diese Mischung mit 9 % den höchsten Holz-Masseanteil (24 % PCM) der schwereren Reihe hat.

Zunächst werden die Probekörper in einen Lagerungsbehälter gegeben. Am Behälterboden befindet sich der Abstandshalter von 5 mm und die Prüfflüssigkeit (demineralisiertes Wasser). In einer Kühltruhe erfolgt die Steuerung der Frost-Tau-Zyklen nach den im CIF-Test von Prof. Setzer vorgegebenen Zeiten und Temperaturen. (Abb. 7.77+7.78) Nach jeweils 14, 28, 42 und 56 Frost-Tau-Wechseln wird die Abwitterung an den Probekörpern mittels Ultraschallbad gelöst und die Prüfflüssigkeit gefiltert. (Abb. 7.83) Ferner wird die Schalllaufzeit im Wasserbad ermittelt.



Abb. 7.77 Truhe zur Steuerung der Frost-Tau-Zyklen



Abb. 7.78 Lagerungsbehälter mit Probekörper

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Ergänzende Untersuchungen

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Ergänzende  
Untersuchungen

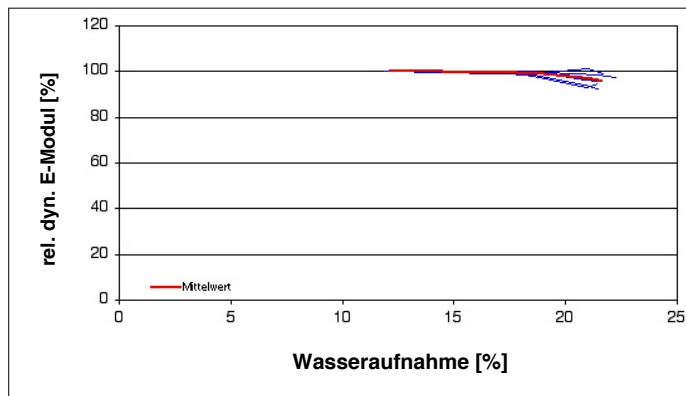
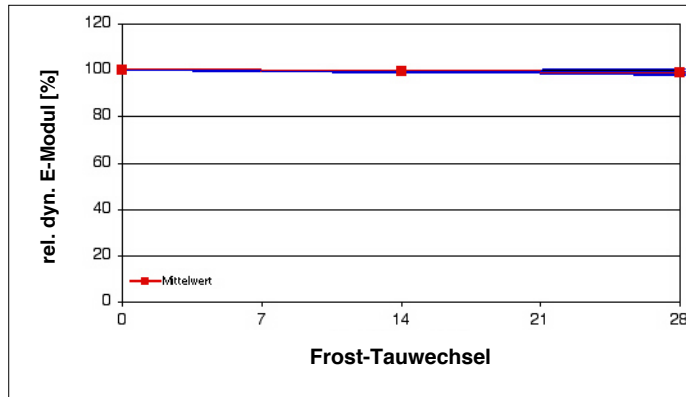
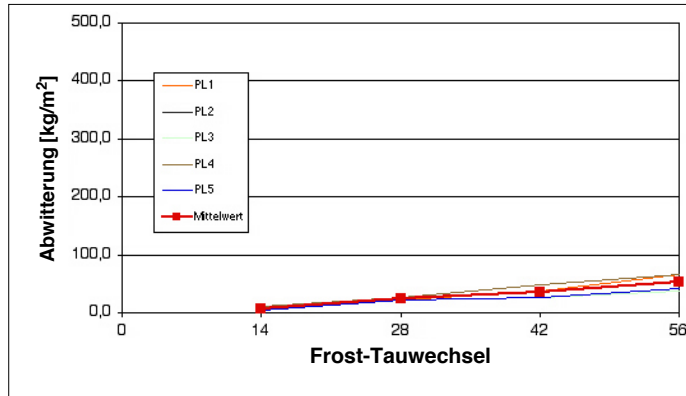


Abb. 7.80 Auswertung Abwitterung  
Rezeptur III ('leicht')

Abb. 7.81 ... relativer dynamischer  
E-Modul Rezeptur III  
( 'leicht' )

Abb. 7.82 ... Wasseraufnahme Re-  
zeptur III ('leicht')

Probendaten:		
Proben-Kennzeichnung:	Rezeptur III / 1+4	Rezeptur VI / 1+4
Herstelldatum:	13.05.2002	13.05.2002
Prüfdatum:	3.07.2002	3.07.2002
Prüfalter:	51 Tage	51 Tage
Ergebnisse als Mittelwerte		
Zahl der F-T-Wechsel	56 Wechsel	56 Wechsel
Abwitterung	53 g/m <sup>2</sup>	92 g/m <sup>2</sup>
Rel. dyn. E-Modul	96,0 %	95,6 %
Wasseraufnahme	21,5 Vol. %	8,0 Vol. %

Abb. 7.79 Prüfung der Frost-Tau-(F-T-)Wechselbeständigkeit nach dem  
CIF-Verfahren. Probendaten des Prüfbericht Nr.: 2002000284  
(R III) und Prüfbericht Nr.: 2002000285 (R VI)

Mit einem Messgerät (Pundit) lassen sich anhand der Schallimpulsübertragungen die Veränderungen im Materialgefüge bestimmen. (Abb. 7.84) Die Auswertung der Messwerte erfolgt nach dem CIF-Verfahren.

Die Untersuchungen zeigen bei beiden Holzleichtbeton-Mischungen aufgrund der festgestellten Veränderungen des relativen dynamischen E-Moduls, einen geringen Schädigungsgrad des Materials. Den Richtwert (1500 g/m<sup>2</sup>) für eine maximale Abwitterung unterschreiten die Proben deutlich. Diese Ergebnisse stellen, zumindest von den Ausgangsbedingungen her gesehen, zunächst in der Form eine gewisse Überraschung dar. Erstaunlich ist darüber hinaus, dass hinsichtlich der Schädigungen am Material gerade die leichte Mischung mit einem

Abwitterungswert von 53 g/m<sup>2</sup> fast um die Hälfte unter dem der schweren Mischung mit 92 g/m<sup>2</sup> liegt. (Abb. 7.79–7.82)

Wie erstaunlich gering der Schädigungsgrad nach 56 Frost-Tau-Wechseln bei den beiden Mischungen ist, wird ebenfalls an den Oberflächen der Probenstücke sichtbar.

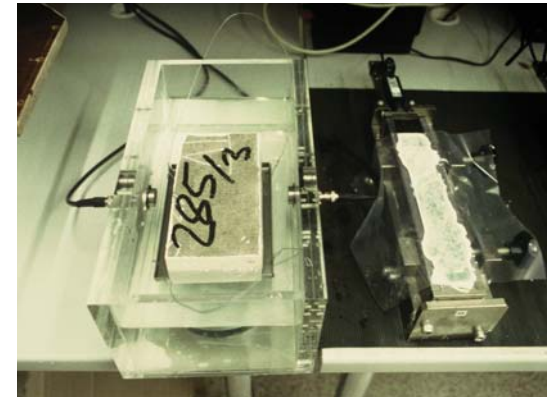
(Abb. 7.85–7.88)

Einer der Gründe für den guten Frost-Tau-Widerstands von Holzleichtbeton scheint die besondere 'Zähigkeit' des Gefüges von Zement-Holz-Wasser-Mischungen zu sein, das trotz offener Oberflächen Abplatzungen verhindert. Allerdings sind die spezifischen Phänomene auf materialtechnologischer Ebene noch im Einzelnen zu bestimmen.

#### 7.8.4 Brandversuche

Die Baustoffe werden, wie bereits in Kapitel 5.3.5 dargelegt, hinsichtlich ihres Brandverhaltens, das auch von der Art der Zuschlagstoffe und ihrer Einbindung in das Materialgefüge bestimmt ist, in zwei Hauptkategorien unterschieden: (Abb. 7.89)

- nicht brennbar (Klasse A)
- brennbar (Klasse B)



Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Ergänzende  
Untersuchungen



Abb. 7.83 Wiegen der Proben nach jedem Frost-Tau-Zyklus

Abb. 7.84 Prüfeinrichtung zur Messung der Schalllaufzeit

Abb. 7.85 Probe 284\_1 (Rezeptur III/‘leicht’) vor Prüfung

Abb. 7.86 ... nach Prüfung

Abb. 7.87 Probe 285\_1 (Rezeptur VI/‘schwer’) vor Prüfung

Abb. 7.88 ... nach Prüfung

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Ergänzende  
Untersuchungen

Baustoff- klasse	Bauaufsichtliche Zulassung	Materialien (Auswahl) *
A	nicht brennbare Baustoffe	
A 1		Zement, Beton, Glas, Metall, Steinzeug, Keramik
A 2		Gipskartonplatten, Mineral- faserplatten m. org. BM
B	brennbare Baustoffe	
B 1	schwerentflammbar	Holzwoolleleichtbauplatten
B 2	normalentflammbar	Holz und Holzwerkstoffe mit d = > 2 mm
B 3	leichtentflammbar	Holz mit d = < 2 mm, Papier

Abb. 7.89 Einteilung von Baustoffen entsprechend ihrem Brandverhalten in Baustoffklassen nach DIN 4102-1, Mai 1998, S. 3

\* Vgl. Rostásy, 1983, S. 66

Im Betonatlas heißt es zum Beton, dass alle Arten "aus natürlichen Zuschlägen und aus Blähton, Blähschiefer oder Hüttenbims [...] nicht brennbare Baustoffe der Klasse A 1" sind.<sup>90</sup>

Für den Holzleichtbeton zeigen die Untersuchungen an der EPF Lausanne/I-Bois, dass bei einem Holzmasseanteil < 15 % maximal die Baustoffklasse A 2 möglich ist. Davon ausgehend, stellt sich die Frage ob für die Mischungen mit einem PCM auf paraffinischer Basis (= 'reines' Wachs = brennbar) diese Einstufung überhaupt zu erreichen ist. Nach den vorliegenden Erfahrungen der Fa. RUBITHERM mit organischen PCM-Materialien sind jedoch bei einem reinen PCM-Anteil von ≤ 15 % keine brandschutztechnischen Probleme zu erwarten.<sup>91</sup> Bei den Mischungen der Betonage 2 weist die Rezeptur VIII mit 29-Masse-Prozent den höchsten PCM-Anteil auf. Da bei diesen PCM jedoch etwa 2/3 der Masse das Verbundmaterial einnimmt, wird dieser (Grenz-)Wert nicht überschritten.

Abb. 7.90 Position der Messfühler (TE)

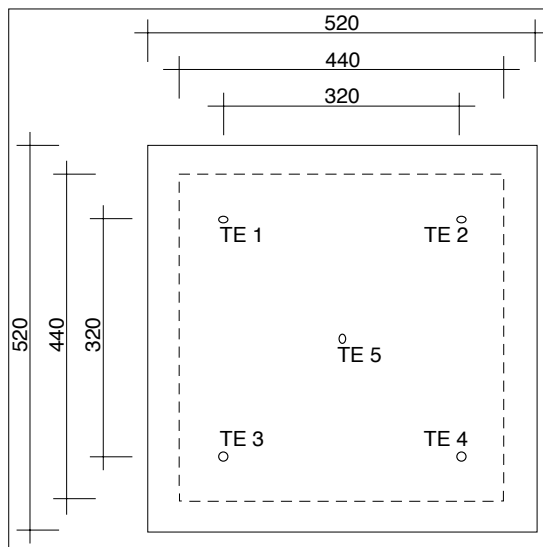


Abb. 7.91 Musterplatte im Kleinbrandofen



Zur Einschätzung und Überprüfung des Brandverhaltens von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien erfolgen zwei experimentelle Untersuchungen. Zunächst wird in einem Kleinbrandofen eine Musterplatte eingesetzt um die Feuerwiderstandsdauer zu testen. In einem weiteren Schritt werden Platten von zwei verschiedenen Rezepturen einem Brandschachttest unterzogen.

Der Kleinbrandofen-Test erfolgt am Institut für Holzforschung der Technischen Universität München.<sup>92</sup> Dabei wird eine Musterplatte der Rezeptur V<sup>93</sup>, mit den Abmessungen 520 x 520 x 60 mm, vor die Heizkammer eines Kleinbrandofens eingesetzt. An der außenliegenden Oberfläche befinden sich fünf Messfühler, die jeweils die Oberflächentemperatur aufzeichnen. (Abb. 7.90+7.91)

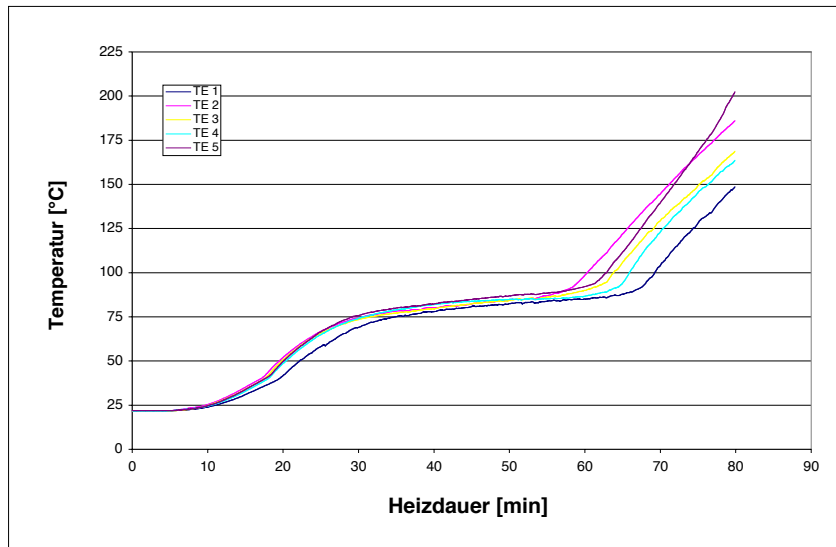


Abb. 7.92 Gemessene Temperaturen auf der Probe während des Versuches im Kleinbrandofen beim Institut für Holzforschung/TU München

Die Aufheizung des Ofens erfolgt anhand eines standardisierten Verlaufs. Der Versuch wird beendet, wenn einer der Messfühler eine Temperatur von  $\geq 200\text{ °C}$  feststellt oder im Mittel alle fünf Messfühler eine Temperatur von mehr als  $150\text{ °C}$  anzeigen.

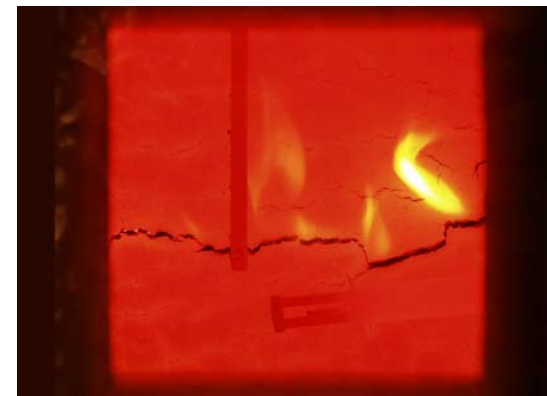
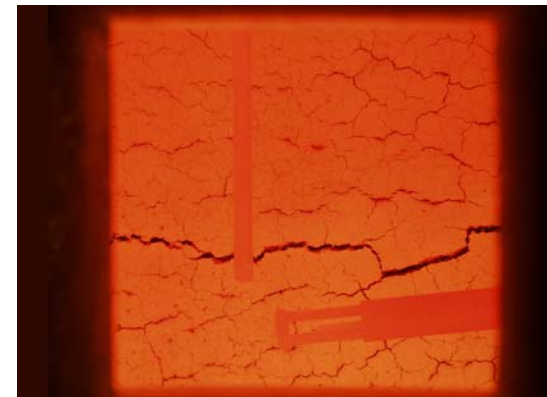
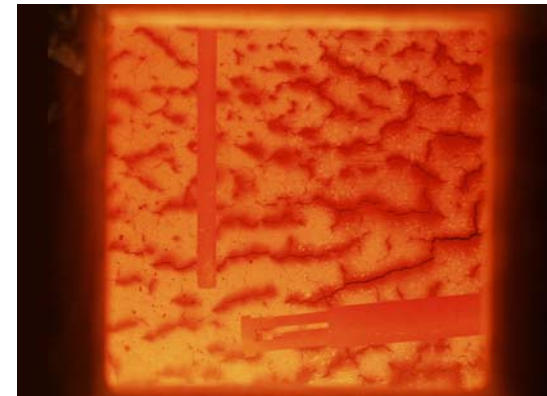
Betrachtet man den Temperaturverlauf, zeigt sich ein ausgeprägter 'Sattel', der nach 30 Minuten und einer Oberflächentemperatur von etwa  $75\text{ °C}$  einsetzt. In der folgenden halben Stunde steigen die gemessenen Temperaturen geringfügig auf etwa  $85\text{ °C}$ . Danach lässt sich ein steiler Anstieg feststellen bis nach 80 Minuten Versuchszeit die Solltemperatur überschritten wird und die Platte entflammt. (Abb. 7.92– 7.95)

Das Ergebnis ist zunächst angesichts des 'hohen' PCM-Anteil (23 Masse-Prozent) sehr positiv. Welchen Einfluss das 'höhergrädige'

Abb. 7.93 Blick in die Heizkammer des Kleinbrandofens nach etwa 30 Minuten. An den sich unter der Temperaturerhöhung bildenden Rissen in der Plattenoberfläche ist deutlich die austretende Feuchte des Materials zu sehen

Abb. 7.94 ... nach etwa 60 Minuten

Abb. 7.95 ... nach etwa 80 Minuten, die Musterplatte beginnt zu entflammen



Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Ergänzende  
Untersuchungen



Abb. 7.96 Brandschacht (auf dem Photo keine Holzleichtbeton-Proben) vor dem Prüfverfahren

*RUBITHERM*-Material, mit einer Schmelzpunkt von etwa 45 °C, einnimmt, kann anhand solch eher einfacher Untersuchungsaufbauten nur schwer abgeschätzt werden. In des lässt der Kurvenverlauf vor allem darauf schließen, dass die im Holzleichtbeton gebundene Feuchtigkeit ein wesentlicher Grund für das retardierende Verhalten darstellt. Nachdem das Wasser verdampft ist, verringert sich die Brandwiderstandsdauer erheblich.<sup>94</sup>

Bei den zweiten Untersuchungen zum Brandschutz werden jeweils vier Musterplatten der Rezepturen III sowie VI, mit den Abmessungen 190 x 1100 x 30 mm, bei dem Otto-Graf-Institut (FMIPA) der Universität Stuttgart (Vaihingen) nach DIN 4102, Teil 1 im Brandschacht geprüft.<sup>95</sup>

“Der Brandschacht besteht aus einem senkrecht stehenden Gehäuse mit quadratischem Querschnitt, in das von unten ein gleichbleibender Luftstrom eingeblasen und aus dem oben Rauchgas abgeführt wird.” Darin “befindet sich ein quadratischer Gasbrenner zur Beflammung der Proben, die in einem Gestell schlotartig um den Brenner angeordnet sind.”<sup>96</sup> (Abb. 7.96)

Die Ergebnisse zeigen das für Zement gebundene Spanplatten typische Brandverhalten. Es besteht eine für A 2 (also > 35 cm) ausreichend große Restlänge bei der Materialprobe. Der höhere Zementanteil in Rezeptur VI gegenüber Rezeptur III wird in der unterschiedlichen Restlänge auch sichtbar. (Abb. 7.97) Während des Brandschachttests entsteht jedoch eine zu hohe maximale Rauchgastemperatur. Diese liegt bei beiden Rezepturen bei 132 °C. Damit wird der Grenzwert für B 1 < 200 °C unterschritten, aber nicht die für A 2 geforderten < 125 °C. Zudem ist festzustellen, dass bei der maximalen “Rauchgasdichte von gemessenen 8 % (beziehungsweise 33 % ·

min im Integral) auch Probleme bei der für Baustoffklasse A 2 erforderlichen Rauchgasentwicklung, sowohl unter Verschwelungsbedingungen als auch unter Luftzufuhr” bestehen.<sup>97</sup>

Daraus resultiert, dass Holzleichtbeton mit PCM-Material nur in Baustoffklasse B 1, als brennbarer, aber schwerentflammbarer Baustoff, einzustufen ist.<sup>98</sup>

### 7.8.5 Untersuchungen zum Feuchteausgleichsverhalten<sup>99</sup>

Das feuchtetechnische Verhalten von Baustoffen hat viele baupraktische Bedeutungen. So kann eindringende Feuchte zu Schädigungen im Material führen und Feuchteänderungen können Verformungen verursachen. Feuchtigkeits- und Wärmeschutz sind ebenfalls eng miteinander gekoppelt, da eine Durchfeuchtung des Materials den Wärmedurchgangswiderstand mindert. Für Innenräume stellen das Wasseraufnahme- (Sorption, das heißt die Eigenschaft Feuchte in den Poren einzulagern) und Wasserabgabevermögen (Desorption) wichtige Parameter dar. Die Feuchtigkeitsaufnahme kann durch Wasserdampfdiffusion oder durch kapillare Leitung erfolgen. Ebenso zu beachten ist die Abgabe von Feuchte, die durch den Feuchtigkeitsübergang auf der Bauteiloberfläche sowie den Feuchtigkeitstransport aus dem Inneren bestimmt wird.<sup>100</sup>

Bei plötzlichem Anstieg und Schwankungen der relativen Luftfeuchte müssen die Baustoffe von Innenräumen Feuchte aufnehmen, speichern und später durch Trocknung wieder abgeben. Sie tragen zur Regulierung des Raumklimas bei. Hinsichtlich der Sorptionsfähigkeit zeigt sich, dass organische Stoffe (Holz, Wollstoffe etc.) im Vergleich zu anorganischen Stoffen, wie Beton “erheblich mehr Feuchte speichern können.”<sup>101</sup>

Abb. 7.97 Brandschachtergebnisse der Holzleichtbetonplatten Rezeptur III und VI, durchgeführt beim Otto-Graf-Institut (FMIPA)/ Universität Stuttgart (Vaihingen)  
\* RS: unversehrt

	Dicke	Raumgewicht	Glühverlust	Restlänge
	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[cm]
R III	28,5	689	42,7	VS: 37*
R VI	32	980	38,7	VS: 46*

Dies gilt als ein Grund für die physiologisch häufig als problematisch empfundenen Sichtbetonflächen in Innenräumen.

Der Holzleichtbeton (mit oder ohne Latentwärmespeichermaterialien) kann als Kompositmaterial durch den Holz-Anteil, auch wenn der Anteil des organischen Zuschlagsstoffs < 17 Masse-Prozent beträgt, im Verbund beim Feuchte-Verhalten deutlich besser abschneiden. Daher erfolgen an den Rezepturen III und VI ebenfalls Untersuchungen zum Feuchteausgleichsverhalten bei der Fa. Delzer Kybernetik in Lörrach.

Diese Materialprüfung lässt sich mittels zweier unterschiedlicher Methoden durchführen: Mit einem so genannten "statischen" oder dem "dynamischen" Messverfahren. Beide bei der Fa. Delzer entwickelten und eingesetzten Prüfungen werden in einer geschlossenen und isolierten Kammer durchgeführt. (Abb. 7.98+7.99)

Bei dem statischen Verfahren wird in der Prüfkammer über eine definierte Wasseroberfläche eines Behälters Wasser verdunstet. Die während des Zeitverlaufs gemessenen Parameter (Abb. 7.100) sind die relative Feuchte und die Temperatur. Nach Abschluss des Tests wird die verdunstete Wassermenge über den verbliebenen Anteil ermittelt. Anhand dieser Werte können unterschiedliche Materialproben miteinander verglichen werden.<sup>102</sup>

Der Versuchsaufbau startet bei einer Temperatur von 25 °C, bei der sich eine relative Feuchte zwischen 65 und 70 % in der Kammer einstellt. Unter den nahezu konstanten Bedingungen verdunstet Wasser und der Wassergehalt in der Luft steigt an. In Abhängigkeit vom Feuchteaufnahmevermögens des Probenmaterials verändert sich die relative Feuchte. Die Verläufe zeigen in den ersten 30

bis 60 Minuten einen sprunghaften Anstieg, der je nach Material gedämpft wird. In fünf Versuchsreihen werden neben den beiden Holzleichtbetonproben Sperrholz, Kunststoff und Gipskarton in verschiedenen Kombinationen hinsichtlich des Feuchteaufnahmeverhaltens betrachtet.<sup>103</sup> Die kombinierte Abbildung von Temperatur und relativer Feuchte ermöglicht im direkten Vergleich die Darstellung der Wechselwirkungen. Die Ordinate nachse zeigt die Anzahl der Messpunkte; bei den statischen Messungen erfolgt die Aufzeichnung der Feuchte- und Temperaturwerte alle 30 Sekunden.

Der Versuch<sup>104</sup> mit Holzleichtbeton 'leicht' und Sperrholz startet in der Prüfkammer bei einer Temperatur von 23,7 °C und relativen Luftfeuchte von ≈ 67,8 %. Im Vergleich zeigt sich nach einem ersten Messdurchgang (22 Stunden), dass beim Sperrholz deutlich mehr Wasser verdunstet (6,70 g, etwa 20 %) als beim Holzleichtbeton (5,55 g), das heißt die Referenzprobe weist ein höheres Feuchteaufnahmevermögen auf. Über einen fast dreifach so langen Zeitraum in getauschten Kammern durchgeführt bestätigt sich das Ergebnis (HLB 15,9 g vs. Sperrholz 17,5 g). Die Differenz bei der Wasserverdunstung fällt jedoch deutlich geringer aus (≈ 10 %). (Abb. 7.101)

Daraus resultiert, dass sich über einen längeren Zeitraum die Feuchteaufnahme des leichteren Holzleichtbetons dem günstigen Verhalten

Abb. 7.98 Versuchsaufbau (mit Holzleichtbetonprobe) und Messeinrichtung bei der Fa. Delzer Kybernetik/Lörrach

Abb. 7.99 Verwendete Materialproben

Abb. 7.100 Erfasste Meßgrößen



Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Ergänzende Untersuchungen

Versuchsplatte	Gewicht	Abmessungen
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[cm]
Holzleichtbeton (R III)	≈ 1000	40 x 60
Holzleichtbeton (R VI)	≈ 1300	40 x 60
Sperrholz (Referenz)		40 x 60

Meßgrößen	
%rF	relative Feuchte in Prozent
°C	Temperatur in °C
li_Box	linke Prüfkammer
re_Box	rechte Prüfkammer
HLB (1)	leichtes Element
HLB (2)	schweres Element

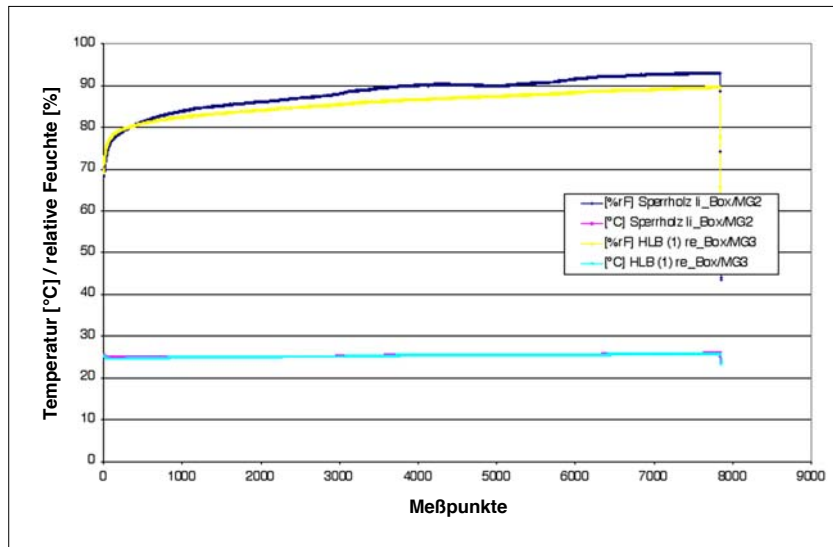
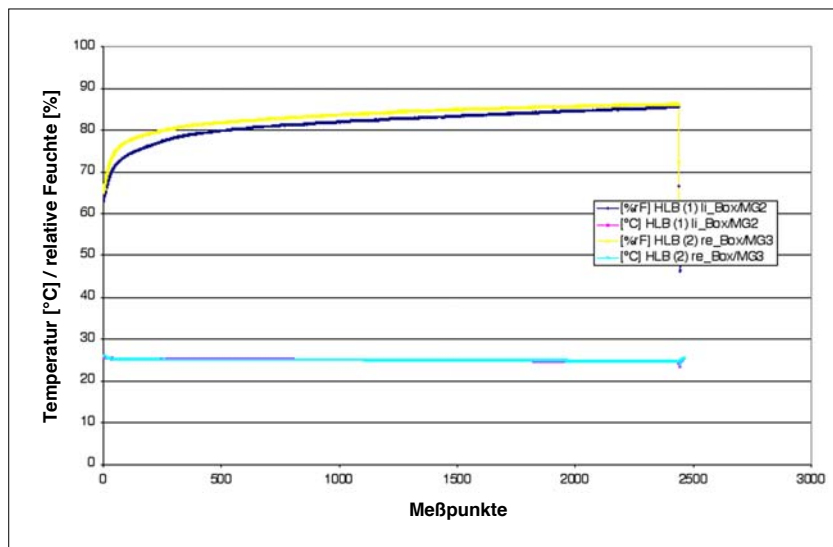


Abb. 7.101 Vergleich des Feuchtaufnahmeverhaltens von Sperrholz (blau) und Holzleichtbeton 'leicht' (gelb)<sup>105</sup>  
(Versuch 22, Fa. Delzer Kybernetik/Lörrach)

Abb. 7.102 Vergleich des Feuchtaufnahmeverhaltens von Holzleichtbeton 'leicht' (blau) und Holzleichtbeton 'schwer' (gelb)  
(Versuch 24, Fa. Delzer Kybernetik/Lörrach)



ten von (Sperr-)Holz deutlich annähert. Betrachtet man die beiden Holzleichtbetonmischungen miteinander zeigt sich, dass die Feuchtaufnahme bei dem leichteren, porösen Material etwa um 10 % höher ausfällt. Allerdings ist über den Meßzeitraum (20 Stunden) eine kontinuierliche Angleichung festzustellen. (Abb. 7.102)

Der Vergleich<sup>106</sup> des schwereren Holzleichtbetons mit einer Gipskartonplatte zeigt einen ähnlichen Verlauf. Hierbei ist der Einfluss der Kartonbeschichtung auf die Feuchtaufnahme noch zu klären.

Über diese "statische" Untersuchung hinaus berücksichtigt ein dynamischer Test des Feuchtausgleichsverhaltens die gesamten Materialeigenschaften (Masse, Speicherfähigkeit, Wärmeleitung, Feuchtaufnahme und Feuchttransport) als Einflussparameter. Diese Untersuchungen erfolgen über Abkühlungs- und Erwärmungsvorgänge in derselben luftdichten Kammer. Temperatur und relative Feuchte sind variabel einzustellen. Im Verlauf des Tests wird der Messkammer Wärme entzogen und wieder zugeführt. Bei Wärmezug kühlt sich der Raum ab; an der Kühlfläche kondensiert die Feuchte, die beim Aufheizen wieder verdampft.

"Die Eigenschaften des Prüfmateri als in der Schnelligkeit der Feuchtaufnahme über die Oberfläche und den Weitertransport ins Material sowie die Feuchtaufnahme im Material beeinflussen die relative Feuchte in der Prüfkammer."<sup>107</sup>

Wird nun beim "Abkühlen vom Prüfmateri al Feuchte abgegeben, sinkt die Abnahme der relativen Feuchte langsamer. Das Gleiche gilt in umgekehrter Form für den Aufheizvorgang. Ist die Oberfläche aktiver [das heißt nimmt das Material Feuchte auf], wird die Anfangsspitze bei der relativen Feuchte im Testraum geringer ausfallen. Ist die Feuchweiterlei-



ung in das Material dahinter groß“, werden die “gesamte[n] Feuchteschwankungen“ in der Prüfkammer im Testraum geringer.<sup>108</sup>

Wie bei dem “statischen“ Verfahren werden die Abläufe reproduzierbar, das heißt “parallel in zwei Prüfkammern und zur Elimination von Unterschieden in der Prüf- und Messvorrichtung mit ausgetauschten Proben“, durchgeführt. Dadurch lassen sich die Ergebnisse mit “unterschiedlichen Prüfobjekten direkt vergleichen und bewerten.“ Als Referenzprobe dient ebenfalls eine Sperrholzplatte, da dieses Material “sehr gute und reproduzierbare Vergleichsgrößen“ liefert.<sup>109</sup>

Auswertung und Aufzeichnung erfolgen analog der vorher dargestellten Weise, allerdings mißt das Messgerät den Feuchte- und Temperaturwert in der Prüfkammer pro Minute, das heißt bei Versuch 13 ist eine Versuchsdauer von 20 Stunden abgebildet. (Abb. 7.103)

Die Messung<sup>110</sup> beginnt mit 63,9 beziehungsweise 62,7 % relativer Feuchte und 19,8 beziehungsweise 19,4 °C Temperatur in den Boxen (links/rechts). Nachdem sich die Feuchte bei etwa 79 % (Holzleichtbeton ‘schwer’) und 81 % (Holzleichtbeton ‘leicht’) eingependelt hat, wird nach etwa 7 Stunden die Temperatur auf knapp 0 beziehungsweise 2 °C heruntergefahren. Mit dem Temperaturabfall sinkt die Feuchte auf Werte um 50 %. Kontinuierlich fährt man anschließend die Temperatur in der Prüfkammer wieder bis auf etwa 14,5 °C herauf, um damit das Feuchteausgleichsverhalten der Probekörper zu testen. Dabei fällt zunächst auf, dass bezüglich der Temperaturschwankungen das schwerere Element träger reagiert.

Interessant ist der Vergleich<sup>111</sup> zwischen dem leichten Holzleichtbeton und dem Sperrholz.

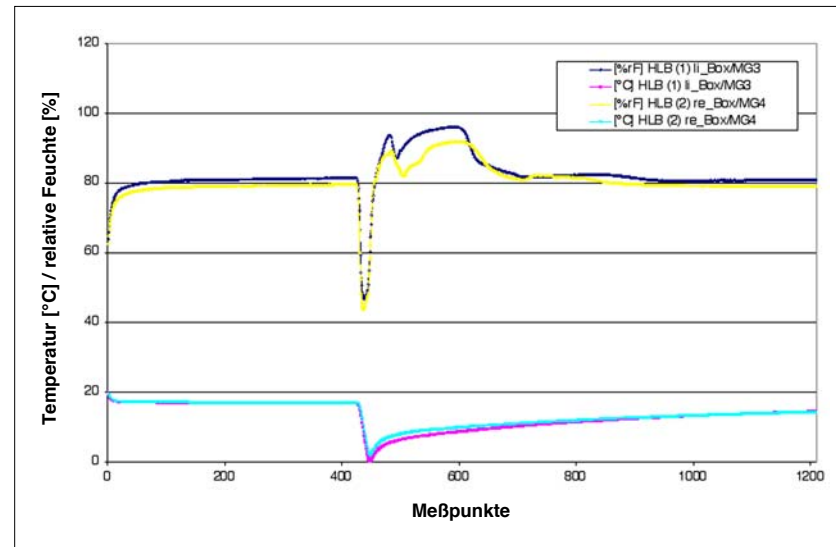
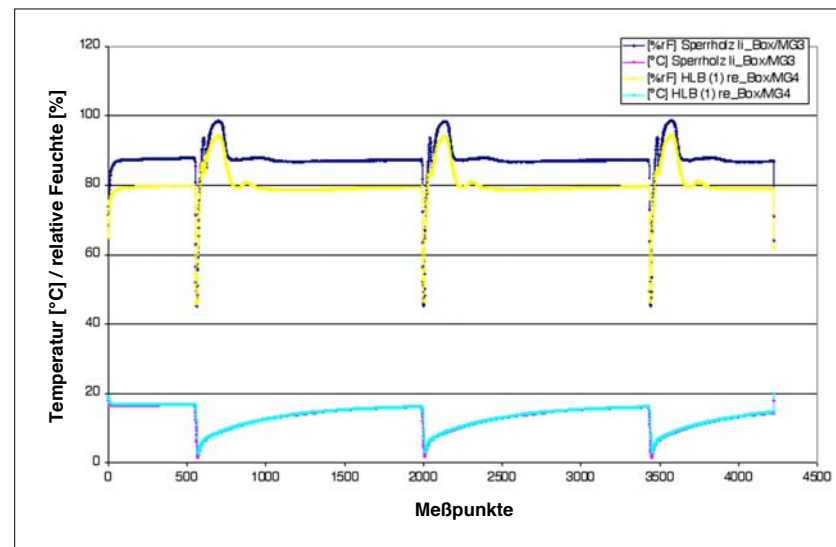


Abb. 7.103 Vergleich des Feuchteausgleichsverhaltens von Holzleichtbeton ‘leicht’ (blau) und Holzleichtbeton ‘schwer’ (gelb) (Versuch 13, Fa. Delzer Kybernetik/Lörrach)

Abb. 7.104 Vergleich des Feuchteausgleichsverhaltens von Sperrholz und Holzleichtbeton ‘leicht’ (gelb) (Versuch 17, Fa. Delzer Kybernetik/Lörrach)



Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Ergänzende Untersuchungen

Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Potenzial-  
abschätzung

Gegenüber der Referenzprobe ist die relative Feuchte im Prüfraum beim Holzleichtbeton um 5 bis 6 % geringer, das heißt das Material puffert mehr Feuchte. Dieser Effekt wird bei der Gegenprobe noch stärker sichtbar; die Unterschiede betragen zwischen 10 und 11 %.<sup>112</sup> (Abb. 7.104)

Die Messungen liefern für den Holzleichtbeton "ein sehr gutes Ergebnis". Beim Feuchteausgleichsverhalten schneidet dieser gegenüber der Referenzplatte aus Sperrholz nur geringfügig schlechter ab. Im Vergleich der Holzleichtbeton-Mischungen verhält sich die schwerere Rezeptur etwas günstiger. Zwar kann das leichtere, porösere Material besser die Feuchte aufnehmen, puffert jedoch nicht im gleichen Maße die Wärme.

"Der Hauptgrund liegt in der größeren Masse bei gleichzeitig etwas schlechteren Eigenschaften im Feuchtverhalten (Aufnahme und Transport). Für die Kurzzeitdynamik hat sich das etwas günstiger ausgewirkt. Die größere Masse sorgt für ein größeres Beharrungsvermögen bei der Temperatur, das etwas schlechtere Feuchteverhalten sorgt für eine längere höhere Feuchte in der Prüfkammer."<sup>113</sup>

Diese Einschätzungen des Holzleichtbetons sind eher von qualitativer 'Natur', das heißt prinzipielle Vorgänge des Feuchte- und Wärmeverhaltens des Baustoffs konnten in einem validierten Versuchsaufbau ermittelt werden. Eine quantitative Bewertung, insbesondere hinsichtlich der (primär-)energetischen Auswirkungen des Materialeinsatzes, ist (noch) schwierig, da es sich hinsichtlich Raumklima und Wärmehaushalt von Gebäuden um einen Teilaspekt handelt.

Zur Regulierung eines als behaglich empfundenen Raumklimas können Materialien wie der Holzleichtbeton mit ihrer stabilisierenden

Wirkung, das heißt der Verringerung von Schwankungen der relativen Luftfeuchte oder Pufferung von Feuchtespitzen, wie sie beim Duschen auftreten, einen guten und wirksamen Beitrag leisten.

Dies hat zum Beispiel konkrete Auswirkung auf die Lüftung von Gebäuden. Bei Materialien mit gutem Feuchteverhalten kann insbesondere im Winter und in der Übergangszeit tagsüber der hygienisch erforderliche Luftwechsel zum Abführen der Raumluftfeuchte ausreichen, wenn kurze, zeitlich begrenzte Belastungsspitzen hinsichtlich des feuchtebedingten Frischluftbedarfs (zum Beispiel bei Versammlungsräumen) durch das Material der Umschließungsflächen gepuffert werden. Dadurch können Lüftungsanlagen kleiner dimensioniert werden, mit dem Effekt signifikanter Energie- und Kosteneinsparungen.

Die durchgeführten Untersuchungen sehr vielschichtiger physikalischer Wirkmechanismen dienen zweierlei: zunächst einer ersten Einschätzung des Materials hinsichtlich des Feuchteaufnahme- und -ausgleichsverhaltens; darüber hinaus stellen die generierten Daten eine wichtige Basis für eine komplexe, auf eine kybernetische Betrachtung basierende dynamische Gebäudesimulation für Wärme und Feuchte dar.

Für eine solche Untersuchung, die auch einen Vergleich unterschiedlicher Wandaufbauten ermöglicht, ist eine breite Datenlage zum Holzleichtbeton geschaffen worden.

## 7.9 Potenzialabschätzung

Aufbauend auf den materialspezifischen Untersuchungen soll<sup>114</sup> eine Potenzialabschätzung zu den Holzleichtbetonmischungen mit PCM-Material durchgeführt werden. Forschungsarbeiten zu Einsatzmöglichkeiten von Latentwärmespeichermaterialien im Baubereich zeigen, dass eine 'effiziente' Verwendung vor allem bei der Reduktion von sommerlicher Überhitzung in Verwaltungsbauten zu erwarten ist.<sup>115</sup> Daher wird anhand eines Süd orientierten Büroraums das thermische Verhalten von Holzleichtbeton (mit und ohne Beimischung von PCM) in insgesamt sechs Varianten verschiedener Trennwandaufbauten untersucht. Die Arbeiten werden beim ZAE Bayern, Abt. 4: Solarthermie und Biomasse, in Garching durchgeführt.

### 7.9.1 Einflüsse sommerlicher Überhitzung

Betrachtet man das thermische Verhalten von Gebäuden, so ist vor allem in der Hitzeperiode über den Tag ein Anstieg der Raumlufttemperatur festzustellen, das heißt es erfolgt eine 'Anpassung' an die Außentemperaturen.

Die Raumlufttemperatur ist Resultat vielschichtiger Wechselwirkungen zwischen äußeren und inneren Einflüssen:

- Lage und Standort des Gebäudes
- Materialwahl und Konstruktionsart
- Anteil von Öffnungsflächen
- Solarstrahlung
- Interne Wärmeeinträge, von Personen, Bürogeräte, Belichtung, Heizung, Lüftung und gegebenenfalls Kühlung
- Art, Maß und Häufigkeit von Lüftungsvorgängen

Eine vereinfachte Darstellung kann wesentliche Grundphänomene der sommerlichen

Überhitzung qualitativ veranschaulichen. Angenommen, die Raumtemperatur eines südorientierten Büros beträgt am Morgen eines wolkenlosen Sommertages 18 °C. Über den Tag erwärmen sich Raumluft und Umschließungsflächen. Gegen Abend kann die Temperatur 27 °C betragen.

Bei einer hohen Temperaturamplitude der Außenluft ist in den Nachmittagsstunden mit Überhitzungseffekten zu rechnen. Grundsätzlich bewirken schwerere Bauweisen einen geringeren Anstieg, dämpfen die Amplitude bis zum Faktor 3 und führen damit zu einer ausgleichenden Wirkung. (Abb. 7.105)

Mit ansteigender Raumtemperatur erfolgt über primäre und sekundäre Speicherprozesse auch eine Temperaturerhöhung der Bauteiloberflächen und Zeit versetzt der tieferen Schichten. Dabei ist der Anteil der Einspeicherung von der spezifischen Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Materialien abhängig. Insgesamt bewirken diese Speicherprozesse (im Idealfall) eine Verteilung der tagsüber eingelagerten Wärme in die Abend- und Nachtstunden. Die Einspeicherung ist jedoch auch durch die Höhe der Oberflächentemperaturen begrenzt; diese sollten für ein behagliches Raumklima ein  $\Delta T$  von 3 bis 4 K zur Raumlufttemperatur – wie schon ausgeführt – nicht überschreiten.<sup>116</sup>

Maßgeblich für die Aufheizung am nächsten Tag ist die 'Entladung' der eingespeicherten Wärme. Bei Konzepten der so genannten "passiven Kühlung" werden hierzu "natürliche Kältequellen" wie Nachtluft oder Erdreich genutzt. Dabei haben die nächtlichen Außenlufttemperaturen einen wichtigen Einfluss auf deren Wirksamkeit. Klimaaufzeichnungen und -auswertungen zeigen, dass in Mitteleuropa in der Regel ausreichende Temperaturunterschiede über das Jahr für eine effiziente Nachtlüftung bestehen.<sup>117</sup>

Ferner belegen Untersuchungen von Bürogebäuden, dass der Komfortbereich nach DIN 1946<sup>118</sup> durch passive Kühlungsstrategien selbst in Hitzeperioden "(fast) immer eingehalten werden" kann. Passive Kühlung mit Nachtlüftung erfordert jedoch eine strikte Reduzierung solarer und interner Wärmelasten über den Tag und eine wirksame Nutzung der thermischen Speichermasse im Gebäude.<sup>119</sup>

Durch die kühlere Außenluft kann der Büroraum mit steigender Nacht-Luftwechselrate, zum Beispiel durch geöffnete Fenster oder ein aktives Lüftungssystem, effizienter 'entwärmt' werden. Bleiben die Fenster indes über Nacht geschlossen, kann die Temperatur im Büro am nächsten Morgen noch 25 °C betragen. Unter gleichen Witterungsbedingungen führt dies zu einer stärkeren Erwärmung des Raumes am nachfolgenden Tag.

Diese (etwas vereinfacht) dargestellten Einflüsse verdeutlichen folgende wichtige Zusammenhänge: Für die Vermeidung von sommerlicher Überhitzung stellt neben den externen und internen Lasten die thermische Speicherkapazität der Materialien einen wichtigen Parameter dar. Eine Überhitzung des Raumes kann durch schwerere Bauweisen verlangsamt werden, jedoch muss die in den Bauteilen gespeicherte Wärme durch Nachtlüftung mit entsprechenden Luftwechselraten wieder entladen werden.

Ziel der nachfolgenden Untersuchungen ist es, die thermische Wirkung von Wandaufbauten aus Holzleichtbeton (mit und ohne PCM-Material) bei der Reduktion einer sommerlichen Überhitzung ohne aktive Kühlstrategien und technische Anlagensysteme, sondern lediglich unter Einsatz von erhöhter Nachtlüftung, abzuschätzen.

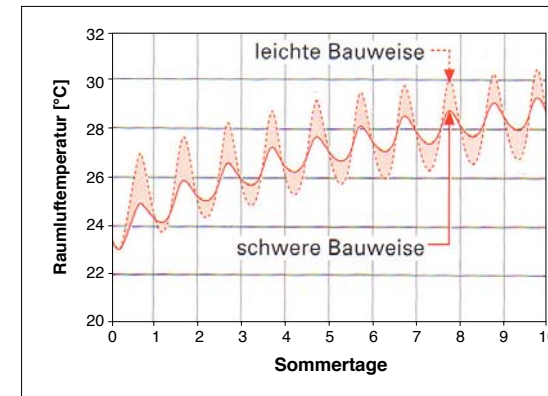


Abb. 7.105 Vergleich des sommerlichen Verhaltens einer leichten und schweren Bauweise

### 7.9.2 Beschreibung des Beispierraums

Der Potenzialabschätzung ist ein Büroraum eines Verwaltungsgebäudes mit 'typischen' Abmessungen zugrunde gelegt, dessen Schmalseiten nach Süden (Außenfassade) und zu einem Erschließungsgang im Norden orientiert sind. Der Raum liegt zwischen benachbarten Büroräumen. Die lichten Maße betragen 6,00 m x 3,48 m bei einer Raumhöhe von 2,70 m, woraus eine Nettogrundfläche von 20,9 m<sup>2</sup> resultiert. Außenwand, Decke und Boden sowie Wand zum Flur bestehen aus einer Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise. (Abb. 7.106)

In den Untersuchungen werden jeweils die Bürotrennwände, die knapp 40 % der Raumschließungsflächen einnehmen, hinsichtlich der Aufbauten mit unterschiedlicher Wärmespeicherkapazität betrachtet. Vorab sind zwei Randbedingungen zu berücksichtigen. Die angenommene baukonstruktive Ausführung des Büroraums weist bereits relativ hohe thermische Speichermas-

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Potenzialabschätzung

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Potenzial-  
abschätzung

sen gegenüber konventionellen Verwaltungs-  
bauten auf. Im Bereich der Decke wird auf  
eine (partielle) Belegung mit Holzleichtbeton-  
Schichten beziehungsweise additiven Ele-  
mente verzichtet, obwohl die Decken im Be-  
reich von (passiven und vor allem aktiven)  
Kühlungsstrategien besser thermisch 'anzu-

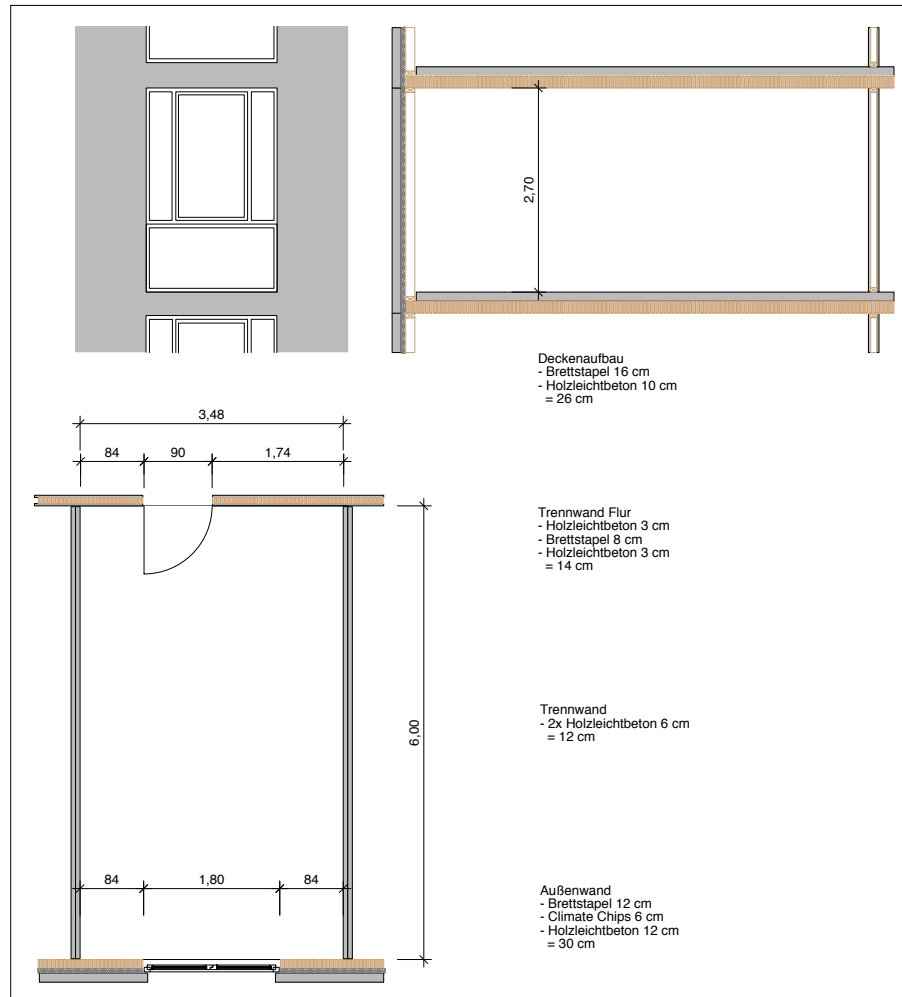
koppeln' sind. Auch besteht dort nicht das  
Problem einer Flächenbelegung, durch eine  
Möblierung mit Tischen, Stühlen, Regalen  
etc.<sup>120</sup> Bei dem vorgeschlagenen Beispiel-  
raum handelt es sich in der Summe um eine  
praxisnahe Speicherfläche. Die gestalteri-  
schen Potenziale von sichtbaren Brettstapel-

konstruktionen stellen auch einen wichtigen  
Aspekt da. Darüber hinaus ist davon auszu-  
gehen, dass über den zugrunde gelegten  
Deckenaufbau ohne Bauteiltemperierung  
kaum Steigerungseffekte zu erwarten sind.

Die Auswahl der Holzleichtbeton-Mischungen  
erfolgt basierend auf einer leichten und  
schweren Ausgangsmischung, die jeweils  
noch mit PCM-Material (Rezeptur V und VIII  
der Betonage 2) angereichert sind. Diese Vor-  
gehensweise wird gewählt, um innerhalb der  
jeweiligen Holzleichtbeton-Mischungen die er-  
warteten Effekte des PCM besser aufzeigen  
zu können. Es ist hierbei zu berücksichtigen,  
dass sich mit dem PCM-Material (23 Masse-  
Prozent Rezeptur V und 29 Masse-Prozent  
Rezeptur VIII) die Rohdichte gerade bei der  
leichten Mischung nahezu verdoppelt und bei  
dem schwereren Holzleichtbeton um knapp  
15 % erhöht. (Abb. 7.107)

Das im Rahmen der Arbeiten aus Gründen  
der Verfügbarkeit verwendete *RUBITHERM*-  
Material mit Schmelzpunkten von etwa 45 be-  
ziehungsweise 54 °C ist für raumseitige An-  
wendungen zum sommerlichen Überhitzungs-  
schutz nicht geeignet. Für diesen Einsatzbe-  
reich müssen die PCM einen niedrigen  
Schmelzpunkt aufweisen, der zwischen 22  
und 26 °C, also dem Komfortbereich, liegen  
sollte. Daher werden für das PCM Schmelz-  
punkte von 22 beziehungsweise 24 °C ange-  
nommen. Dies stellt keine Fehlerquelle dar,  
weil auch für diese neuen, teils noch in Ent-  
wicklung befindenden, niedrig schmelzenden  
PCM die Schmelzenthalpie, Wärmeleitfähig-  
keit und Rohdichte im Bereich des vermesse-  
nen *RUBITHERM*-Materials liegen.<sup>121</sup>

Abb. 7.106 Büroraum, der den Simulationsstudien zugrunde gelegt wurde



### 7.9.3 Einflüsse der Bauweise auf die Wärmespeicherfähigkeit des Raums

Die Abschätzung des sommerlichen Verhaltens von Räumen (und Gebäuden) erfolgt in

DIN V 4108-2 unter anderem anhand der Berechnung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit der Bauarten.<sup>122</sup>

Zur Berechnung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit wird die Wärmekapazität aller raumseitig angeordneten Bauteile bis zu einer Tiefe von 10 cm aufsummiert,<sup>123</sup> und durch die Nettogeschossfläche (NGF) geteilt. Diese Größe hat somit die Einheit einer Wärmekapazität pro Fläche (Wh/m<sup>2</sup>K) und ist ein Maß für die "thermische Schwere" eines bestimmten 'Raumaufbaus'. Sie ist geeignet zur vereinfachten Einteilung von Konstruktionen in verschiedene thermische "Bauschwereklassen" und beschreibt die Wärmeaufnahme des Raumes pro m<sup>2</sup> NGF bei einer Temperaturerhöhung von einem Kelvin.<sup>124</sup>

Die Berechnung der sensiblen Wärmekapazität führt zu einer ersten Einordnung hinsichtlich der thermischen Masse der sechs ausgewählten Aufbauten. Die jeweiligen Abweichungen zwischen der leichten («-5») und schweren («-8») Variante betragen etwa 30 % (REF / PCM) beziehungsweise 40 % (HLB). Es fällt indes auf, dass die sensibel wirksame Wärmespeicherfähigkeit zwischen den Aufbauten REF-8 / HLB-5 und HLB-8 / PCM-5 nahezu gleich ausfällt, was auf die Rohdichtewerte zurückzuführen ist.

Die DIN V 4108-2 berücksichtigt nur die sensible Wärmeaufnahme. Um auch Wandaufbauten mit PCM in ähnlicher Form anhand einer einfachen Größe 'bemessen' zu können, wird in den nachfolgenden Untersuchungen zusätzlich deren latente Wärmeaufnahme (Schmelzwärme), durch eine entsprechende Temperaturerhöhung des Raums geteilt und als wirksame thermische Wärmekapazität berechnet. Hierbei geht man von einer mittleren täglichen Temperaturschwankung der raumseitigen Bauteile von 5 Kelvin aus. Diese latenten Anteile der Wärmeaufnahme sind in

		HLB 'leicht'	HLB+PCM R V	HLB 'schwer'	HLB+PCM R VIII
Rohdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	≈ 600	1177	1265	1437
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0,156	0,324	0,436	0,492
spezifische Wärmekapazität (sensibel)	[kJ/kgK]	1,32	1,18	1,08	1,35
Schmelzenthalpie (latent)	[kJ/kg]	-	13,26	-	17,01

Abb. 7.107 Materialkennwerte der eingesetzten Holzleichtbeton-Mischungen

Abbildung 7.108 gelb dargestellt. Die Fehlerbalken stellen die Abweichungen bei einer mittleren Tagesdifferenz von 3 beziehungsweise 10 K dar.<sup>125</sup>

Die gesamte thermisch wirksame Speicherfähigkeit des Raumes (sensibel und latent) bewegt sich in einem Bereich zwischen 60 und 160 Wh/m<sup>2</sup>K für die leichteren sowie zwischen 80 und 275 Wh/m<sup>2</sup>K für die schwereren Mischungen. (Abb. 7.108)

"Bei diesen Betrachtungen wird von einer stationären, gleichmäßigen Erwärmung des Raumes und aller Bauteile ausgegangen. Dies ist hilfreich, um die physikalischen Zusammenhänge und die grundsätzliche Eignung der PCM-Beimischung darstellen und die erwarteten Effekte" der verschiedenen Aufbauvarianten einer ersten Einschätzung unterziehen zu können. Die unter realistischen Bedingungen 'tatsächlich' wirksamen Einflüsse auf Wärmespeicherung und Raumtemperatur, das heißt die dynamischen Wechselwirkungen von Solarstrahlung, internen Lasten und Nachtlüftung werden erst in den Simulationsrechnungen abgebildet.<sup>126</sup>

#### 7.9.4 Beschreibung der untersuchten Simulationsvarianten<sup>127</sup>

Um festzustellen, wie sich die thermische Speicherfähigkeit der Umschließungsflächen auf die Anzahl der Überhitzungsstunden im Raum auswirkt, werden "thermische Gebäudesimulationen mit 4-minütiger Zeitschrittweite über jeweils ein Jahr durchgeführt." Alle Simulationen erfolgen jeweils für hohe und reduzierte interne Lasten und drei verschiedene Nachtluftwechselraten.<sup>128</sup>

Als Nutzungszeitraum wird für den Raum eine Büroarbeitszeit von Montag bis Freitag, jeweils 8:00 bis 18:00 Uhr, zugrunde gelegt. Alle Simulationsberechnungen erfolgen für drei verschiedene Aufbauten:

- Trennwand in Metallständerbauweise<sup>129</sup> als Referenzfall (REF)
- Trennwand aus Holzleichtbeton (HLB)
- Trennwand aus dem Verbund von Holzleichtbeton und PCM-Material (PCM)

Die angehängten Zahlen «5» und «8» verweisen auf die leichte und schwere Holzleichtbetonmischung der Rezepturen V beziehungsweise VIII. Somit stehen sechs bauliche Vari-

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Potenzialabschätzung

Holzleichtbeton mit  
Latentwärme-  
speichermaterialien

Potenzial-  
abschätzung

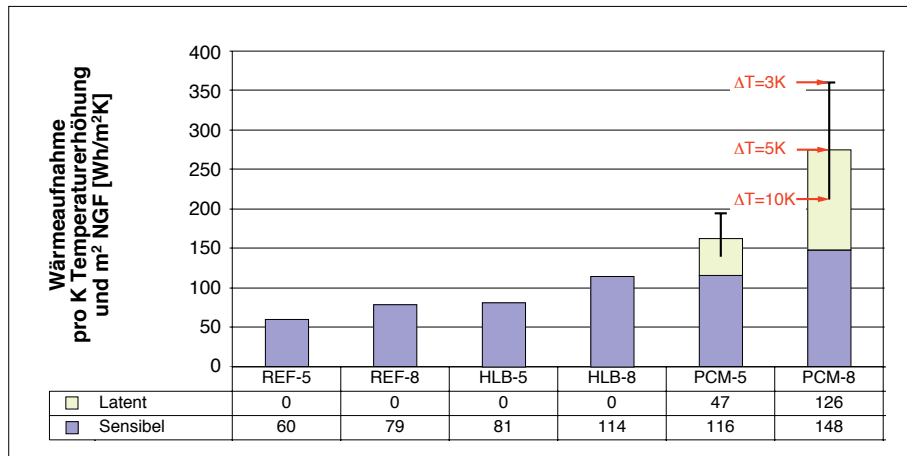


Abb. 7.108 Wirksame thermische Speicherfähigkeit aller Bauvarianten

anten mit unterschiedlichen internen Lastfällen und Luftwechselraten zur Auswahl. Das PCM wird im Rahmen dieser Potenzialabschätzung in Form eines rechteckigen Schmelzpunkts mit 3 K Breite abgebildet, mit angenommenen 22 °C. Innerhalb dieses Temperaturbereichs vollzieht sich der Aufschmelz- und Erstarrungsvorgang. Zur Untersuchung des Einflusses der Schmelztemperatur erfolgen ebenfalls Berechnungen mit einem Schmelzpunkt von 24 °C.

Den solaren Energieeintrag beeinflussen der Öffnungsflächenanteil<sup>130</sup>, der aus dem Verhältnis von Öffnungsfläche zur Raumgrundfläche resultiert – im vorliegenden Fall  $\approx 23\%$  – der Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung (g-Wert) sowie Lage und Regelung einer Verschattungseinrichtung. Aus der Vielzahl möglicher Kombinationen werden im Rahmen dieser Studie exemplarisch eine 2-Scheiben Wärmeschutzverglasung ohne sowie mit Verschattung ab einer Einstrahlung von 150 W/m<sup>2</sup> gewählt.

Während solare Einträge grundsätzlich durch Abschattungssysteme reduziert werden können, lassen sich hohe interne Wärmelasten, zum Beispiel durch die Abwärme von Personen, Bürogeräten, Beleuchtung, nur durch aktive Kühlung oder schwere Bauweise mit effizienter passiver Nachtlüftung unterbinden. Die beiden zugrunde gelegten Last-Szenarien von 410 und 610 Watt variieren hinsichtlich des Energieverbrauchs der Bürogeräte.

Während der Bürozeiten wird grundsätzlich der hygienisch erforderliche Luftwechsel mit einer Luftwechselrate von 1/h aufrechterhalten. Für den Sommerfall wird außerhalb der Bürozeiten die Luftwechselrate variiert und werden drei verschiedene Varianten mit konstanter ein-, vier- und achtfacher Nachtlüftungsrate untersucht. (Abb. 7.109) Liegt die Außenlufttemperatur unter der Temperatur des Raums, kann über eine Nachtlüftung Wärme abgegeben werden; dabei steigt die Wärmeabgabe mit Zunahme der Luftwechselrate.

Dabei bleibt unberücksichtigt, “ob diese Luftwechselraten mechanisch erzwungen werden oder einen Mittelwert für natürliche Lüftung durch geöffnete Fenster oder Klappen darstellen.” Eine mögliche Temperaturregelung der Nachtlüftung ist nicht abgebildet.<sup>131</sup> Untersuchungen verschiedener Lüftungskonzepte bei sommerlichen Spitzentemperaturen in Büroräumen zeigen, dass die passive Lüftung bei “nachts geöffneten Fenstern im Hinblick auf die maximalen sommerlichen Raumtemperaturen Grenzen hat.” Betrachtet man allerdings den gesamten Jahresverlauf wird deutlich, dass auch mit Fensterlüftung (nachts offen) “die sommerlichen Raumtemperaturen bis auf wenige heiße Tage im Hochsommer recht gut begrenzt werden können”, da durchaus ein “5 bis 10-facher Luftwechsel erreicht werden” kann.<sup>132</sup> Damit liegen die Annahmen von vier- und achtfachen (Nacht-)Luftwechselraten durch Fenster/Klappenlüftung im praxisnahen Bereich.

Vorab ist desweiteren ein wichtiges Kriterium für die Überhitzung festzulegen. In diesem Zusammenhang stellt die kontrovers diskutierte maximale Raumlufttemperatur von 26 °C einen wichtigen Grenzwert dar, da in Abhängigkeit der internen Wärmelasten ein striktes Ein- beziehungsweise Festhalten an dieser Maximaltemperatur durchaus ein Entscheidungskriterium gegen natürliche Lüftungsstrategien sein und den Einsatz einer technischen Klimatisierung erfordern kann. Soll die Gewährleistung einer maximalen Raumlufttemperatur von 26 °C mit rein baulichen Maßnahmen erfolgen erfordert dies vor allem bei Verwaltungsbauten mit einem hohen Verglasungsanteil große Wärmespeichermassen und geringe Strahlungslasten.

Aus den Erfahrungen mit dem sehr unterschiedlichen menschlichen Empfinden und

Verhalten sowie den vielschichtigen Interaktionen von Temperatur, Feuchte, Luftgeschwindigkeit etc., das sich auch in den Behaglichkeitsdiagrammen widerspiegelt,<sup>133</sup> ist daher in DIN 1946-2 eine Grenze für die Überschreitungshäufigkeit von 26 °C am Büroarbeitsplatz mit 10 % angenommen worden.<sup>134</sup> Auf das Jahr bezogen, beträgt dieser Wert unter der angenommenen Nutzung maximal 261 Überhitzungsstunden. In den nachfolgend dargestellten Untersuchungen sind für die gerechneten Varianten die tatsächlich während der Bürozeiten auftretenden Überhitzungsstunden diesem Wert gegenübergestellt.

### 7.9.5 Untersuchungsergebnisse <sup>135</sup>

In einem ersten Schritt werden anhand des Referenzraums mit Trennwänden in Leichtbauweise (REF-8) der Einfluss von Nachtluftwechselrate und internen Lasten ohne Verschattung untersucht. Dabei zeigt sich schnell, dass ohne eine externe Verschattungseinrichtung der Öffnungsflächen im Raum die Grenze von maximal 261 Überhitzungsstunden deutlich überschritten wird. Selbst bei einer zugrunde gelegten Nachtlüftung mit 8-facher Luftwechselrate sind bei internen Lasten von 610 W während 767 Bürostunden über das Jahr die Raumtemperaturen höher als 26 °C (Faktor 3) und unter einer reduzierten Last von 410 W liegt die Anzahl der Überhitzungsstunden (503) immer noch fast um den Faktor 2 darüber. Welch enormen Einfluss eine Verschattung einnimmt, zeigen die durchgeführten Berechnungen der vorgenannten Varianten mit außen liegendem Sonnenschutz, der ab Einstrahlung von 150 W/m<sup>2</sup> wirksam wird. Während die Überhitzung des Referenzraumes für interne Lasten von 610 W mit guter Nachtlüftung (Luftwechselrate von 4/h) noch um etwa 1/4 überschritten wird, kann bereits

bei sehr guter Nachtlüftung (Luftwechselrate von 8/h) mit 172 Bürostunden das Begrenzungskriterium um 1/3 unterschritten werden. Im Falle einer reduzierten internen Last von 410 W zeichnet sich der Effekt noch deutlicher ab. Bereits bei guter Nachtlüftung wird

der Wert der zulässigen Überhitzung mit 103 Stunden um 60 % unterschritten. (Abb. 7.110) Daraus folgt, dass eine Verschattung zwingend vorzusehen und trotzdem noch eine gute Nachtlüftung erforderlich ist.

Kurzbezeichnung	Beschreibung
REF-5	Trennwände in konventioneller Ständerleichtbauweise (...) Außenwand, Trennwand Flur: Holzleichtbeton "leicht", Brettstapel Bodenbelag: Holzleichtbeton "leicht" und Brettstapel Decke: Brettstapel und Holzleichtbeton "leicht"
HLB-5	wie REF-5, Trennwände aus Holzleichtbeton "leicht"
PCM-5	wie REF-5, Trennwände aus Holzleichtbeton+PCM, Rezeptur V
REF-8	Trennwände in konventioneller Ständerleichtbauweise (...) Außenwand, Trennwand Flur: Holzleichtbeton "schwer", Brettstapel Bodenbelag: Holzleichtbeton "schwer" und Brettstapel Decke: Brettstapel und Holzleichtbeton "schwer"
HLB-8	wie REF-8, Trennwände aus Holzleichtbeton "schwer"
PCM-8	wie REF-8, Trennwände aus Holzleichtbeton+PCM, Rezeptur VIII
Sol-U	2-Scheiben Wärmeschutzverglasung ohne Verschattung
Sol-V	2-Scheiben Wärmeschutzverglasung mit Verschattung ab einer Einstrahlung von 150 W/m <sup>2</sup>
Last 410 W	Interne Last von 410 W während der Bürozeiten (entspricht 2 Personen, gelegentliche Beleuchtung und energiesparende Bürogeräte)
Last 610 W	Realistischer Fall von 610 W während der Bürozeiten (entspricht 2 Personen, gelegentliche Beleuchtung und normale Bürogeräte)
Lü1*	Luftwechselrate 1/h auch außerhalb der Bürozeiten
Lü4*	Luftwechselrate 4/h außerhalb der Bürozeiten
Lü8*	Luftwechselrate 8/h außerhalb der Bürozeiten

Abb. 7.109 Parameter (Kurzbezeichnung und Beschreibung) der untersuchten Simulationsvarianten.

\* Alle Lüftungs-Varianten haben eine Luftwechselrate von 1/h während der Bürozeiten

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Potenzialabschätzung

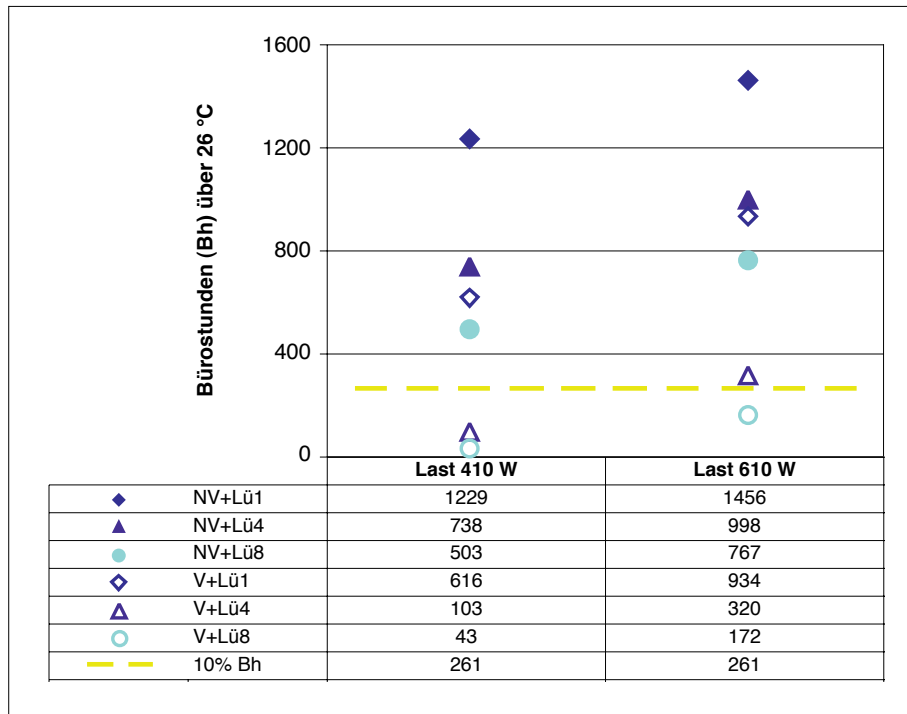


Abb. 7.110 Vergleich von unverschatteten und verschatteten Varianten für den Referenzraum (Leichtbau)  
 NV = Nicht verschattet  
 V = Verschattet  
 Lü = Lüftungsvariante (vgl. Abb. 7.109)  
 Bh = Bürostunden

#### Einfluss von Speichermasse und PCM

In weiteren Betrachtungen wird der Einfluss einer erhöhten thermischen Speichermasse in den Bürotrennwänden auf die sommerliche Überhitzung untersucht. Diese Schritte erfolgen zunächst anhand der schweren Mischungen (Rezeptur VIII, blaue Messreihe), bei einem Standardfall mit Verschattung und interner Last von 610 W.

Die Ergebnisse zeigen deutlich den Einfluss der Nachtlüftungsrate auf die Anzahl der

Stunden über 26 °C. Während bei einfachem Nachtlüftungswechsel alle Varianten um etwa Faktor 3,5 darüber liegen, sinken die Werte mit Holzleichtbeton-Trennwänden bereits bei guter Nachtlüftung um 10 % (HLB-8) beziehungsweise knapp 25 % (PCM-8) unter die zulässige Grenze; bei sehr guter Nachtlüftung mit 71 beziehungsweise 39 Überhitzungsstunden erreichen diese nurmehr etwa 65 beziehungsweise knapp 40 % des 'Normwertes'. Ferner ist deutlich zu erkennen, dass der Zu-

sammenhang von Zunahme der thermischen Speichermasse des Raums und damit einhergehender Abnahme der Überhitzungsstunden keinen linearen Verlauf darstellt. Die Differenz zwischen Referenzwand und Holzleichtbeton (ohne PCM) beträgt bei erhöhter Nachtlüftung etwa zwischen 30 und 60 %, während die Beimischung von PCM, bei Verdoppelung thermischer Speichermasse und einer Nachtlüftungsrate von 4/h nur zusätzliche Effekte von knapp 15 % erzeugt. Bei sehr guter Nachtlüftung werden die Überhitzungsstunden nochmal fast halbiert (von 71 auf 39). Eine solche Reduktion muss aber im Einzelfall mit dem erhöhten Aufwand und den zusätzlichen Kosten abgeglichen werden. (Abb. 7.111)

Diese Untersuchungen werden ebenfalls mit den leichteren Mischungen, bei gleichen Randbedingungen von Verschattung und interner Last durchgeführt. Der Vergleich zeigt große Parallelen, wobei aufgrund der geringeren thermischen Speichermasse der Rezeptur V ('rötliche' Messreihe) das Reduktionspotenzial etwas niedriger ausfällt. Die Zahlenwerte der Überhitzungsstunden der schweren Referenzwand (REF-8) und der leichten Holzleichtbetonwand (HLB-5) insbesondere bei der besseren Nachtlüftung fallen nahezu gleich aus.

Das PCM-Material scheint bei Messreihe «-5» einen deutlicheren Effekt zu erzeugen, was indes auf die geringere thermische Speichermasse (pro NGF) zurückzuführen ist. Es zeigt sich, dass bei der leichten Holzleichtbeton-Mischungen nur mit PCM-Material und mindestens guter Nachtlüftung der Grenzwert unterschritten wird.

Bei reduziertem Lastfall verstärkt sich dieser Effekt. So bleiben die leichteren Holzleichtbeton-Mischungen (ohne und mit PCM) mit ma-



ximal 45 und 25 % (LW 4/h) beziehungsweise 15 und 5 % (LW 8/h) deutlich unter dem Überhitzungskriterium.

Erfolgt ein mindestens vierfacher Nachtluftwechsel, so unterschreiten alle untersuchten baulichen Varianten bei reduzierten internen Lasten den Grenzwert. Dabei weist der leichtere Holzleichtbeton gegenüber der Referenzwand nur mehr zwei Drittel der Überhitzungsstunden auf; diese werden bei Wandaufbauten mit PCM-Material insgesamt fast halbiert. Mit schweren Holzleichtbeton-Mischungen lassen sich die Überhitzungsstunden gar auf ein Fünftel beziehungsweise ein Zehntel (mit PCM) im Vergleich zur Leichtbauwand reduzieren.

#### Einfluss der Schmelztemperatur

Ergänzend zu den vorgenannten Untersuchungen erfolgt abschließend noch anhand der schweren Mischung ein Vergleich zum Einfluss der PCM-Schmelztemperatur auf die Überhitzung des Raums. Hierbei werden zusätzlich Simulationen mit einer Schmelztemperatur des PCM von 24 °C durchgeführt. Wie bei dem bisher abgebildetem PCM (22 °C) beträgt die Breite des Schmelzpunkts in allen Berechnungen 3 K.

Obwohl mit einer niedrigeren Schmelztemperatur des PCM der Phasenwechsel früher wirksam wird, führt dies nur zu einer geringfügigen Reduktion der Überhitzungsstunden. Erst mit deutlicher Zunahme des Nachtluftwechsels ist diese stärker ausgeprägt (bis zu 30 %). (Abb. 7.112)

Auch im Vergleich der unterschiedlichen internen Lastfälle ist der Einfluss unerheblich. Dies Ergebnis "muss allerdings vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass es sich hier um eine bloße Potenzialabschätzung handelt und der Schmelzpeak sehr vereinfacht abgebildet wurde."<sup>136</sup>

#### **7.9.6 Fazit** <sup>137</sup>

Ziel der Untersuchungen ist, hinsichtlich des Einflusses und der Wirksamkeit verschiedener Wandaufbauten aus Holzleichtbeton erste Einschätzungen auf die sommerliche Überhitzung eines südorientierten Büroraums vorzunehmen. Dabei stellt der Verzicht auf "aktive" Kühlstrategien eine wesentliche Randbedingung dar.

Als "passive" Strategien werden eine externe Verschattung (ab einer solaren Einstrahlung von 150 W/m<sup>2</sup>) sowie eine erhöhte Nachtlüftung zugrunde gelegt. Für das Maß der sommerlichen Überhitzung in einem Büroraum

wird als ein Kriterium in Anlehnung an DIN 1946-2 die Anzahl der Stunden gewählt, in denen die empfundene Temperatur über 26 °C liegt. Am Arbeitsplatz darf diese höchstens zu 10 % der Bürozeiten im Jahr überschritten werden.

Die Untersuchungen beschränken sich in dem vorgeschlagenen Raum auf die Bürotrennwände, die etwa 40 % der Umschließungsflächen umfassen. Im Vordergrund der Betrachtung steht dabei der Vergleich von Holzleichtbeton mit und ohne PCM-Material. Beide Varianten werden in einer leichten und einer schweren Mischung gerechnet und ei-

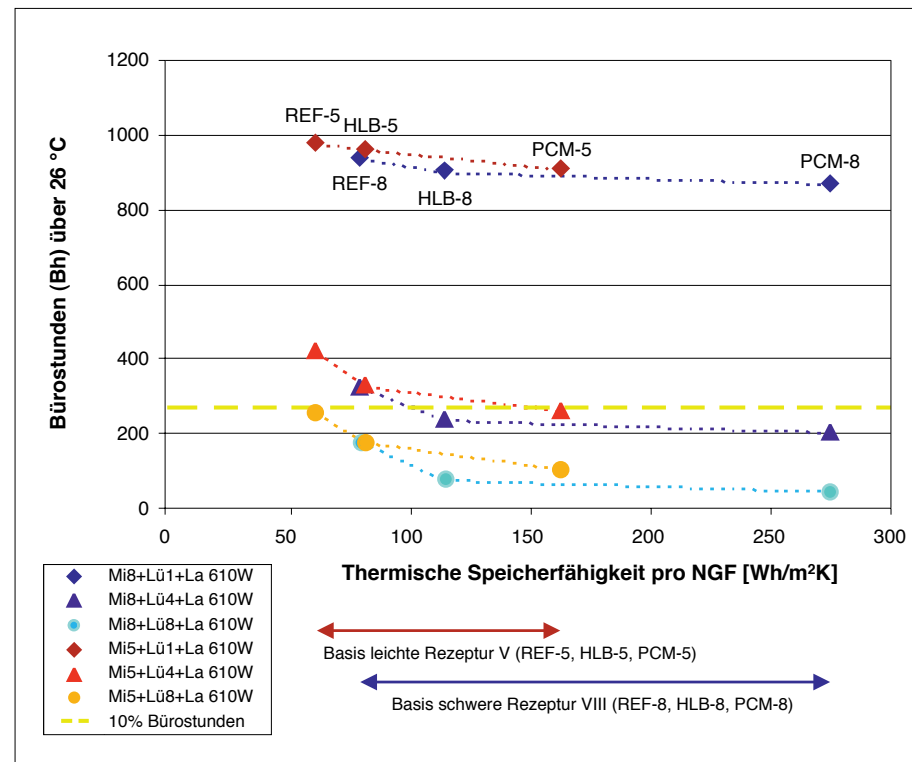


Abb. 7.111 Untersuchte Trennwandaufbauten mit Verschattung und Last 610 W

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Potenzialabschätzung

Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Potenzial-  
abschätzung

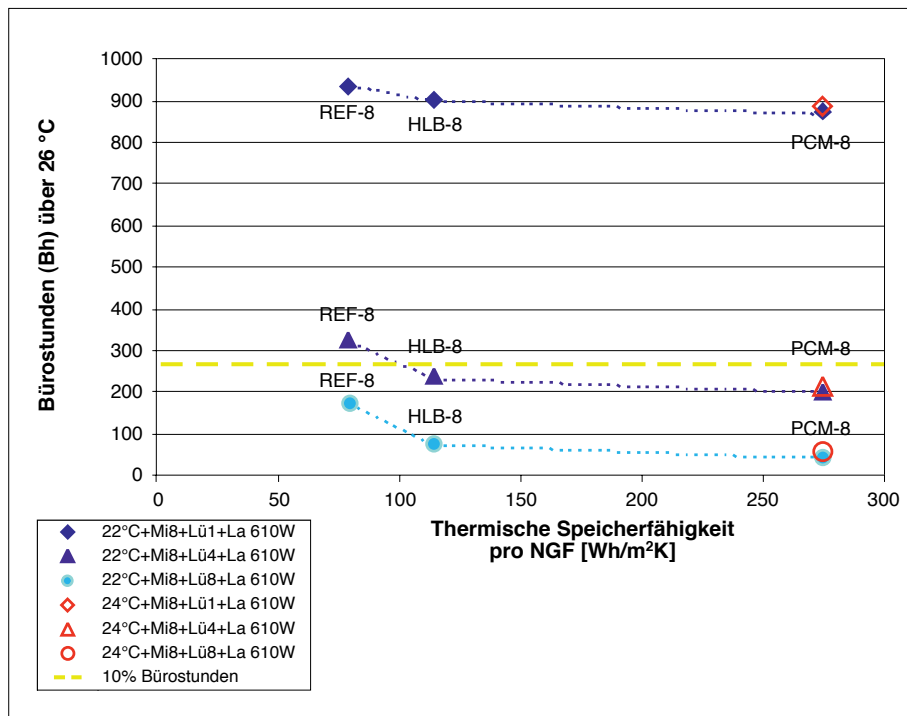


Abb. 7.112 Einfluss der Schmelztemperatur des PCM

nem 'konventionellen' System in Ständerleichtbauweise gegenüber gestellt.

Prinzipiell ist festzustellen, dass bereits zwischen der Referenzwand und dem Holzleichtbeton eine deutliche Reduktion der Überhitzungsstunden eintritt. Mit weiterer Erhöhung der thermischen Speicherkapazität durch die Verwendung von PCM-Material können diese noch etwas gesenkt werden, jedoch nur mehr in geringerem Maße. Dieser Zusammenhang zeigt sich bei allen drei untersuchten Nachtluftwechselraten.

Einen weiteren signifikanten Faktor stellen die internen Lasten dar, die in zwei Varianten (610 W sowie unter Einbeziehung energie-

sparende Bürogeräte 410 W) modelliert werden. Mit reduziertem Lastfall erfüllen alle baulichen Varianten mit 4- und 8-fachem Nachtluftwechsel deutlich die Anforderung. Der 10 %-Grenzwert wird mit den leichten Mischungen auf maximal ein Drittel, bei der schweren gar auf ein Viertel reduziert. Eine niedrige Schmelztemperatur ist zur Vermeidung einer sommerlichen Überhitzung günstiger, da ein deutlicherer Unterschied zur 'kritischen' Temperatur den Speichereffekt zumindest bei erhöhtem Luftwechsel verstärkt; dies zeigt der Vergleich zweier Varianten (22 und 24 °C).

Die Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz von PCM im Holzleichtbeton zu einer Erhö-

hung der thermischen Speicherkapazität eines Raums führt. Dabei ist der Einfluss bei der leichten Mischung erwartungsgemäß größer. Insgesamt lassen die gerechneten Varianten bereits beim 'normalen' Holzleichtbeton bei effizienten "passiven" Lüftungs- und Kühlungsstrategien ein viel versprechendes Potenzial erkennen.

Darüber hinaus ist zu konstatieren, dass eine externe Verschattung, reduzierte internen Lasten und hohe Nachtluftwechselraten wesentliche Einflussparameter darstellen. Mittlerweile stehen bei den "passiven" Kühlungskonzepten zwischen den Extremen Fensterlüftung und Klimaanlage "zahllose Konzeptvarianten mit unterschiedlich intensiver Luftbehandlung" zur Verfügung.<sup>138</sup> Wenn auch bei einer solchen Lüftungsstrategie die Behaglichkeitsfaktoren nicht 'genau' eingestellt werden können, sind doch hinsichtlich des geforderten Temperaturbereichs in der Regel keine Einschränkungen zu erwarten.

Gerade die Kombination von Fensterlüftung und Betonkernkühlung wird hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes von Verwaltungsbauten als "zielführend" bezeichnet und darin vor allem ein "kostengünstiges low-tech-Konzept" gesehen.<sup>139</sup> Inwieweit das vorhandene Potenzial – der thermischen Speicherkapazität – von Holzleichtbeton, ohne und im Verbund mit PCM-Material, bei einer Bauteiltemperierung noch zu signifikanten Verbesserung führt, muss in weiteren Arbeiten erst noch untersucht werden.

## 7.10 Zusammenfassung

### 7.10.1 Oberflächen

Bereits anhand der Oberflächen der Musterplatten aus der Betonage 1 zeigen sich die in der Kombination von Holzleichtbeton und Latentwärmespeichermaterialien liegenden gestalterischen Potenziale. Gegenüber diesen ersten Versuchen sind die 'optimierten' Mischungen vor allem durch einen höheren Anteil des Speichergranulats gekennzeichnet, (Abb. 7.113) der sich auch deutlich in der visuellen Wirkung widerspiegelt. Das PCM-Material wird zum wichtigen Ausdrucksmittel. Dieser Aspekt der Arbeiten zur Kombination von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien zeigt in bisher einzigartiger Weise ein in den Fachdiskussionen überhaupt noch nicht berücksichtigtes Potenzial, nämlich die thermisch hochleistungsfähigen Stoffe in ästhetisch wirkungsvollen Oberflächen auch sichtbar – und damit ablesbar – werden zu lassen.

Im Bereich der leichten Mischungen (Rezepturen I bis V) führt die Verdoppelung des PCM-Gesamtmasseanteils (von 11 auf 13 %), und damit der Verringerung des Holzanteils um etwa 1/3 (von 17 auf 11 %), zu Oberflächen, die von den bis  $\varnothing$  3 mm großen Granulatlattchen dominiert werden. Die aus der Oberflächenbearbeitung resultierenden Anschnitte der Zuschlagsstoffe führen zu verschiedenartigen formalen sowie farblichen Ausprägungen und erzeugen reizvolle Texturen. Durch den hohen Anteil an Speichergranulat tritt die visuelle Wirkung von Zement und Holz etwas zurück, was in beiden Rezepturreihen festzustellen ist. Indes bleibt der 'wärmere' Grundton in den leichten Mischungen spürbar. (Abb. 7.114+7.115)

Demgegenüber zeigt Rezeptur VIII eine 'schöne' Verknüpfung von hohem PCM-Anteil und deutlich andere Oberflächenwirkung, was bei der Diskussion um höhere Gewichtsanteile des PCM-Materials für kleinere Korngrößen ( $< 1$  mm) spricht. (Abb. 7.116)

### 7.10.2 Optimierungen

Nach den umfangreichen Materialprüfungen ist gegenüber den ersten Einschätzungen der Betonage 1 nun eine recht gute Beurteilung der Kombination von Holzleichtbeton und Latentwärmespeichermaterialien möglich, gleichermaßen zum mechanischen und zum thermischen Verhalten. Insgesamt können die positiven Ergebnisse beziehungsweise Einschätzungen weitgehend bestätigt werden. Die Druckfestigkeiten des leichten Holzleichtbetons mit PCM-Material erreichen nicht ganz die Werte der 'normalen' Ausgangsmischungen. Demgegenüber liegt die Druckfestigkeit beim schweren Holzleichtbeton – durch den höheren Zementanteil – mit etwa 20 N/mm<sup>2</sup> deutlich darüber.

Für den betrachteten Anwendungsfall im Bereich von Gebäudefassaden und Innenräumen liegen somit gute mechanische Kenngrößen vor.

Das Schwindverhalten fällt für baupraktische Anwendungen mit Werten zwischen 3,7 und 5,2 mm/m etwas hoch aus, bleibt jedoch innerhalb üblicher Toleranzen des 'klassischen' Betonbaus. Durch die besondere Elastizität des Holzleichtbetons sind Gefügeschädigungen nicht zu erwarten und aufgrund der fehlenden Stahlbewehrung stellen Schwindrisse auch kein Problem für Korrosion dar. Einschränkungen bestehen zur Zeit hinsichtlich des Brandschutzes, da für den Holzleichtbeton in der Kombination mit PCM in dieser Form und mit diesen PCM-Materialien Baustoffklasse A 2 nicht erreichbar ist.

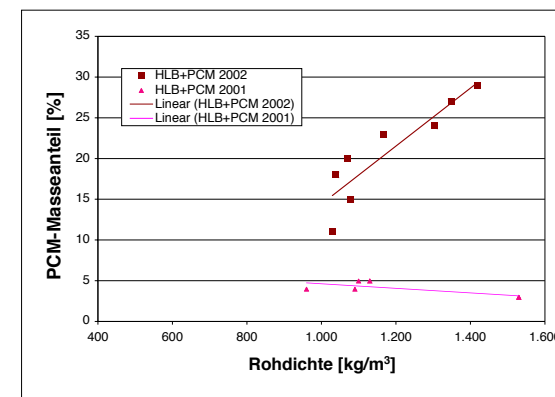
Die thermische Beurteilung spiegelt das große Potenzial in dem Materialkomposit wider. Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei höheren Rohdichten unter dem Bereich der Holzleichtbeton-Ausgangsmaterials. Damit werden die  $\lambda$ -Werte von gängigen Holzwerkstoffen nicht erreicht ( $\leq 0,18$  W/mK). Das Material befindet sich im Bereich von Zement beziehungsweise Gips gebundenen Holzplatten und von Leichtbeton, wobei mit Zunahme des spezifischen Gewichts der Holzleichtbeton günstigere Wärmeleitfähigkeitswerte aufweist.<sup>140</sup> (Abb. 7.117)

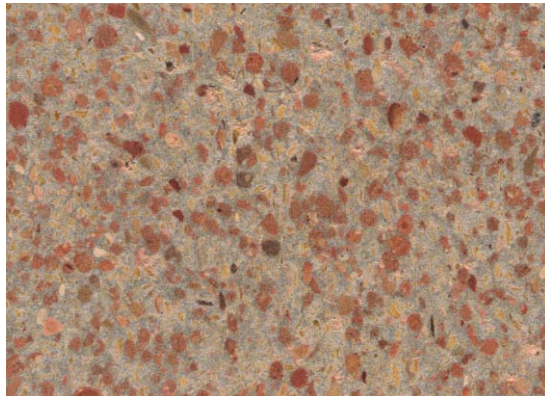
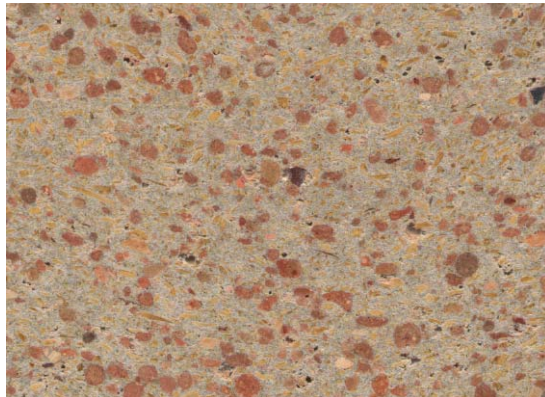
Weitere Vorteile bestehen im Bereich der thermischen Speicherefähigkeit und des Feuchteausgleichsverhaltens. Gerade hinsichtlich der Kombination mit PCM ist bei diesen Anforderungen noch reichlich Optimierungspotenzial zu erwarten. Ferner zeigen die Frost-Tauwechsel-Prüfungen, dass Holzleichtbeton für sichtbare Anwendungen in der Gebäudefassade sich hervorragend eignet. Dies stellt hinsichtlich der gestalterisch interessanten Oberflächen einen wichtigen Aspekt

Holzleichtbeton mit  
Latentwärmespeichermaterialien

Zusammenfassung

Abb. 7.113 Vergleich der PCM-Masseanteile des Holzleichtbetons der Betonage 1 (2001) und der Betonage 2 (2002)





für vielfältige Einsatzmöglichkeiten dar, gleichermaßen für Bodenbeläge wie für Wand- und Deckenoberflächen.

### 7.10.3 PCM-Material

Eine Reihe von zusätzlichen Untersuchungen zur Kombination von Holzleichtbeton mit PCM erfordert indes das PCM-Material. Diese Stoffe stellen auf dem Bausektor zwar keine neue, aber eine in dem letzten Jahrzehnt unter enormem Entwicklungsschub und damit Veränderungsdruck stehende Technologie dar. Somit kann eine getroffene Auswahl für experimentelle Arbeiten schnell verbessert und können augenblickliche Hemmnisse in kurzer Zeit durch eine neue Materialgeneration überwunden sein. Dieser Kontext ist bei den vorliegenden Untersuchungen vor allem hinsichtlich des verwendeten Speichergranulats zu berücksichtigen.

Die durchgeführten Versuche erfolgen mit den *RUBITHERM*-Materialien GR 41 (Korngröße 1 – 3 mm) sowie GR 54 (Korngröße 0,2 – 0,6 mm). Da der Schmelzpunkt bei diesen PCM deutlich über den Temperaturspitzen von Innenräumen liegt (GR 41  $\approx$  45 °C und GR 54  $\approx$  54 °C), sind die Einsatzmöglichkeiten in Decken, Wänden und Böden eingeschränkt beziehungsweise erfordern andere, niedriger schmelzende PCM oder eine Modifikation des Schichtenaufbaus.

Darüber hinaus bestehen nach dem jetzigen Stand der experimentellen Untersuchungen für den Einsatz von gebundenem, das heißt

Abb. 7.114 Rezeptur III (Darstellung 1:1)

Abb. 7.115 Rezeptur VI (Darstellung 1:1)

Abb. 7.116 Rezeptur VIII (Darstellung 1:1)

nicht gekapseltem PCM als Zuschlagsstoff in einem offenporigen Material wie Holzleichtbeton (noch) eine Reihe von bautechnischen Schwierigkeiten.

Es kann durchaus passieren, dass nachdem das PCM bei Raumtemperatur den Phasenwechsel von fest nach flüssig vollzogen hat, bei einem weiteren Temperaturanstieg kondensiert und aufgrund des Dampfdruckausgleichs durch die vorhandenen kapillaren Öffnungen in dem Granulat, die aus der Herstellung resultierten, ausdiffundiert. (Abb. 7.118+ 7.119)

Dabei spielt die Art der Einbringung des PCM (Mischung/Tränkung) keine Rolle; in beiden Fällen muss mit einem 'Verdunstungseffekt', dem "Ausschwitzen" gerechnet werden.<sup>141</sup>

Für Anwendungen im Innenraum, das heißt in Böden, Wänden und Decken, resultiert daraus:

- mehrlagige Ausbildung der Holzleichtbetonoberfläche
- Kombination des Holzleichtbetons mit anderen Trägermaterialien.

Bei der mehrlagigen Ausbildung muss der Holzleichtbeton mit PCM beidseitig dampfdicht ausgebildet, das heißt mit einer Dampfsperre abgedichtet werden. Da in diesem Fall die Sorptionsfähigkeit unterbunden ist, kann dies nur in ausgewählten Flächenbereichen erfolgen. Am Markt werden zahlreiche opake bis transparente 'Schutzanstriche' unterschiedlicher Hersteller angeboten.

In diesem Zusammenhang ist noch zu klären, welche Wirkung die Zementleimmatrix als Dampfbremse beziehungsweise Dampfsperre übernehmen kann. Diesbezüglich fehlen (Langzeit-)Erfahrungen. Es ist zu erwarten, dass gerade die leichten Holzleichtbetonmischungen, weil sehr offenporig, diese Funktion nicht werden leisten können. Auch bleibt noch offen, inwieweit bei 'hydrophobierenden'

Anstrichen, zum Beispiel Dispersionsfarbe, eine ausreichende Haftung im Bereich des Granulats gewährleistet ist. (Abb. 7.120) PCM auf paraffinischer Basis wirken wie Trennmittel. Somit sind Schwierigkeiten bei der Abdeckung zu erwarten; ferner muss eine Materialverträglichkeit berücksichtigt werden.<sup>142</sup> Demgegenüber stellt eine raumseitige 'Bepankung' der Holzleichtbetonwand mit einer 'dampfdichten' Trägerplatte keinen sinnvollen Lösungsansatz dar, da in diesem Bereich die Materialeigenschaften und Oberflächenqualitäten des Holzleichtbetons nicht mehr zur Wirkung kommen. Mittlerweile sind auf dem Markt auch mikroverkapselte PCM-Materialien mit einem Schmelzpunkt unter 28 °C erhältlich.<sup>143</sup> Diese sind hinsichtlich ihrer Eigenschaften erprobt. Da für die Verarbeitung in Zement gebundenen Werkstoffen keine Probleme zu erwarten sind, eröffnen diese PCM auch neue Optionen für den Verbund mit Holzleichtbeton.

Mit dem verwendeten Speichergranulat kann unter anderem die Ausbildung von opaken Flächen in Zwischentemperaturbereichen, zum Beispiel Doppelfassaden oder Wintergärten mit dem Material erfolgen; darüber hinaus können Bauteile aus Holzleichtbeton mit PCM über Lüftungsklappen auch die natürliche Be- und Entlüftung von Räumen unterstützen. In diesem Zusammenhang erscheinen auch 'passive' Luftkollector-Wandaufbauten<sup>144</sup> viel versprechend. Ferner ist die Kombination mit thermisch aktiven Elementen denkbar, wobei in diesem Fall eine Erhöhung des PCM-Anteils sinnvoll erscheint. Zum einen gilt die Bauteiltemperierung für energetisch optimierte Verwaltungsbauten mittlerweile als Standardtechnologie, zum anderen zeigen Pilotanwendungen große Potenziale für die Latentwärmespeichermaterialien, auch im Bereich der Altbausanie-

Holzleichtbeton + PCM	R I	R V	R VI	R VIII
Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1025	1175	1300	1425
Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	410	410	600	600
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	320	350	307	360
Holzgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	175	125	122	95
Körnung Zuschlag "Nadelholz" (Fichte)	4 mm	4 mm	4 mm	4 mm
Vorbehandlung "Nadelholz"	keine	keine	keine	keine
Additive/Zusatzstoffe "PCM-Material"	GR 41	GR 41	GR 41	GR 54
Paraffingehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	116	266	331	432
W/Z-Wert	0,78	0,85	0,51	0,60
Konsistenz	C3/F3	C3/F3	C3/F3	C3/F3
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	1600	2200	3533	4433
Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	5,06	7,71	15,31	19,67
Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	1,57	2,00	2,51	2,00
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0,285	0,324	0,412	0,492
Spez. Wärmespeicherkapazität [J/gK, 0 °C]	1,34	1,07	1,23	1,20

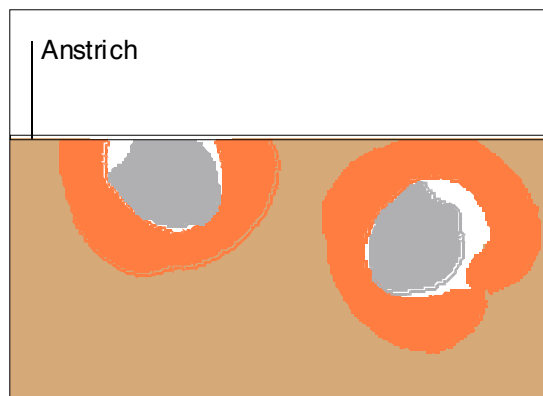
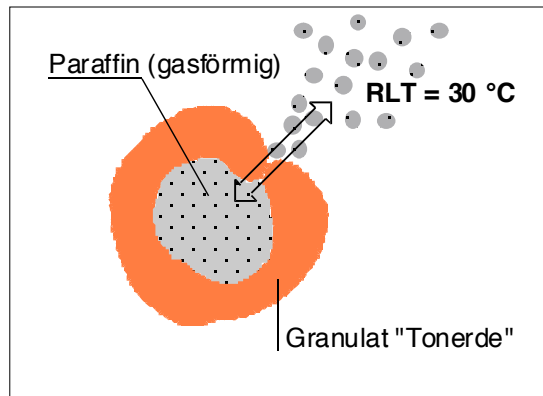
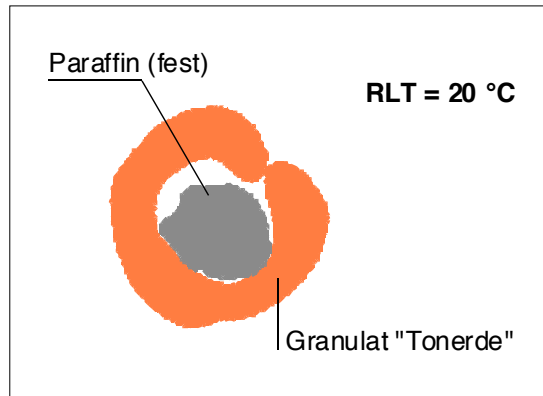
Abb. 7.117 Übersicht von materialspezifischen Kenndaten ausgewählter Holzleichtbetonmischungen mit Latentwärmespeichermaterialien

rung.<sup>145</sup> Allerdings ist zu beachten, dass bei den erforderlichen Maßnahmen für Verrohrung und Anschluss an das haustechnische System etc., es sich eher um einen technisch aufwendigeren und kostenintensiveren Ansatz handelt, das heißt man hat es einerseits mit einem recht einfachen Schüttgut zu tun, andererseits mit einer komplizierten (Apparate-)Technik.

Um die gestalterischen Qualitäten der Holzleichtbetonoberflächen zur Wirkung bringen zu können, sind Anwendungen im Bereich der

Plattenwerkstoffe ebenfalls vorstellbar. Ferner bestehen hinsichtlich der Verarbeitung weitere Optionen, zum Beispiel das 'Tränken'. Bei diesem Verfahren wird zunächst das Bauteil hergestellt. Nachdem Aushärten erfolgt das Eintauchen in das flüssige PCM-Material, um den oberflächennahen Bereich zu tränken. Da Holzleichtbeton eine recht offenporige Oberflächenstruktur aufweist, ist das Material in besonderer Weise für ein solches Herstellungsverfahren geeignet. Allerdings erfordert ein solcher Ansatz hohe Wärmeleitfähigkeiten der "Stützmatrix" und ei-

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien  
Zusammenfassung



nen hohen PCM-Anteil,<sup>146</sup> was beim Holzleichtbeton nur bedingt gegeben ist. Der Holzleichtbeton kann aber auch als abschließende Schicht (etwa 2 bis 4 cm) aufgebracht werden, sowohl in der Schalungsform gegebenenfalls direkt auf ein Trägermaterial als auch (nicht nur im Bestand) auf vorhandene Bauteilschichten.

Im Rahmen der durchgeführten Potenzialabschätzung zeigt sich, dass die Erhöhung der thermischen Speicherfähigkeit zu einer Reduktion der sommerlichen Überhitzung führt (unter Berücksichtigung externer Verschattung und ausreichender Nachluftwechselrate). Damit liegen die Ergebnisse in der Tendenz im Bereich anderer Untersuchungen mit PCM-haltigen Baustoffen. Experimentelle Arbeiten am Fraunhofer-ISE in Freiburg zeigen, dass ein Testraum mit PCM angereichertem Innenputz im Temperaturbereich von 20 bis 26 °C im Mittel 2 K, bei Temperaturen über 30 °C bis zu 4 K kühler als der Referenzraum ist.<sup>147</sup>

Das Maß der thermischen Speicherfähigkeit wird indes nachhaltig durch den PCM-Anteil bestimmt. Dabei scheinen Masse-Anteile zwi-

schen 10 und 40 % ( je nach Anwendungsfall als Zement gebundene Holzwerkstoffe, Gipse beziehungsweise Putze, Spachtelmassen, Farben etc.), 'reines' PCM-Material ein herstellungstechnisch machbarer Zielbereich. Hier liegen die untersuchten Holzleichtbetonmischungen noch unter dem Minimalwert. Auch dahingehend besteht bei verbesserten PCM zusätzlich ein Optimierungspotenzial. Gleichwohl wird die Effizienz dieser Art verarbeiteter PCM-Materialien auch kritisch diskutiert. Für leistungsfähige Kühlungsstrategien gelten als Zielgrößen Belegungsdichten von > 10 bis 20 kg/m<sup>2</sup>,<sup>148</sup> die in dieser Form mit solchen Ansätzen wohl nicht realisierbar sind.

Allerdings darf es bei Material- und Bauproduktentwicklungen nicht nur um eine Teiloptimierung gehen. Die Einsatzmöglichkeiten von Baumaterialien im Bereich von Gebäudefassaden und Innenräumen werden über leistungsfähige funktionale und konstruktive Merkmale auch stark von ästhetischen Parametern bestimmt. Gerade für diesen Anwendungsbereich weist der Holzleichtbeton (mit und ohne Latentwärmespeichermaterialien) sehr gute Eigenschaften auf.

Abb. 7.118 In 'Tonerde' gekapseltes PCM-Material auf paraffinischer Basis in festem Zustand  
RLT = Raumlufttemperatur

Abb. 7.119 In 'Tonerde' gekapseltes PCM-Material ... in gasförmigen Zustand

Abb. 7.120 Haftung von Anstrichen auf den unterschiedlichen Oberflächen  
- Holzleichtbeton  
- angeschnittene Tonerde  
- angeschnittenes Paraffin

### Anmerkungen

- 1 Auch "Raumtemperatur" oder "operative Temperatur" genannt. Vgl. DIN 1946-2, Januar 1994, S. 2
- 2 Vgl. Bundesarchitektenkammer (Hg.), 1996, S. 29-32
- 3 Vgl. Hammer/Jung, Oktober 2000, S. 20, 4
- 4 Bundesarchitektenkammer (Hg.), 1996, S. 67
- 5 Die Wärmeaufnahme die eine Schicht vergleichbarer Stärke "pro Grad Temperaturschwankungsamplitude und pro m<sup>2</sup> Fläche vom Tag bis in die Nacht speichert". Vgl. Bundesarchitektenkammer (Hg.), 1996, S. 67
- 6 Vgl. Hammer/Jung, 2000, S. 20
- 7 Vgl. Hammer/Jung, 2000, S. 15
- 8 Vgl. Innovative PCM-Technologie. In: Tätigkeitsbericht 1999. Würzburg, 2000, S. 25
- 9 Vgl. Mehling, 2002, S. 1
- 10 Vgl. DELTA<sup>®</sup>-PCM Wärmespeicherplatten. Produktion der Fa. Dörken GmbH Herdecke, 03.12.2003

- 11 Vgl. Puch, 03.04.2001, S. V2/7
- 12 Vgl. Mehling, 2002, S. 2, 8
- 13 Vgl. Henning, 2003, o.S.
- 14 Vgl. Mehling, 2002, S. 6-8
- 15 Vgl. Mehling, 2002, S. 1, 4f.
- 16 Schmelztemperatur von 32 °C. Vgl. Hebgen, 1982, S. 81, 88
- 17 Vgl. Detail, 6/2002, S. 736f.
- 18 Vgl. Koschensch, 2003, S. 60-65; SOBIC Seminar, 03.12.2003
- 19 Vgl. Produktunterlagen der Fa. RUBITHERM GmbH, Hamburg (2001)
- 20 Als Manipulatoren bezeichnet man multifunktionale Bauteile vor Öffnungen (Türen, Fenster, Verglasungen) für die gezielte Steuerung der klimatischen und witterungsbedingten Einflüsse in Abhängigkeit des Tages- und Jahresverlaufs. Vgl. Krippner, 2001, o.S.
- 21 Eine Erstanwendung erfolgte bei dem Demonstrationsgebäude "Phoenix" auf der Swissbau 2000 in Basel. Vgl. Lainsecq, 1/2001, S. 40
- 22 Etwa 600 kg/m<sup>3</sup> ≈ 13 kg; 1275 kg/m<sup>3</sup> ≈ 28 kg; 1500 kg/m<sup>3</sup> ≈ 32 kg
- 23 Diese sogenannten "Oriented Strand Board"-Platten haben einen dreischichtigen Aufbau aus Schälspänen. Diese Späne werden in drei Schichten jeweils um 90° versetzt zueinander gestreut. Dabei verlaufen die Längsspäne vorzugsweise in den Deckschichten parallel und in der Mittelschicht quer zur Fertigungsrichtung. Vgl. <http://www.bm-holz.de/Produkte/Platten/schaltafplatten.html> <04.08.2003>
- 24 Während der sich über zwei Jahre erstreckenden Versuchsarbeiten bewährten sich die Schalungsformen sowohl hinsichtlich der Handhabung als auch der Robustheit.
- 25 Tel. Auskunft von Herrn Büttner, Fa. RUBITHERM GmbH, Fürstenwalde, 23.08.2001
- 26 An der EPF Lausanne/I-Bois experimentierte man mit Kalkwasser. Dieses Verfahren soll die den Abbindevorgang verzögernden Holzinhaltsstoffe "neutralisieren" bzw. herausfiltern. Insgesamt wurden indes keine signifikanten Vorteile festgestellt.
- 27 Diesbzgl. wurden bisher keine Untersuchungen durchgeführt. Tel. Auskunft v. Herrn Roider, IEZ Natterer GmbH, Saulburg/Wiesenfelden, 27.08.2001
- 28 Gerade bei kleinen Testreihen besteht häufig das Problem, nicht immer die gleiche Zusammensetzung der Siebfraktion zu erhalten. Tel. Auskunft v. Herrn Roider, IEZ Natterer GmbH, Saulburg/Wiesenfelden, 27.08.2001
- 29 Tel. Auskunft von Herrn Herzig, Fa. Künneth Holz & Logistik KG/Alling/Obb., 31.08.2001
- 30 Vgl. Kap. 5.2.1
- 31 Eine Fraktion, die künftig den Hauptanteil des bei der Holzbearbeitung und Weiterverwendung anfallenden Restsägeholzes ausmachen wird. Gespräch mit Herrn Herzig, Fa. Künneth Holz & Logistik KG/Alling/Obb., 31.08.2001
- 32 Gespräch mit Herrn Dr. Kling, Bauberatung Zement Bayern/München, 31.07.2001
- 33 Seit (Herbst) 2003 bietet die Fa. RUBITHERM ein Speichergranulat GR 27 mit Korngrößen zwischen < 0,5 und > 4 mm an. Vgl. Datenblatt v. 20.10.2003
- 34 Zum Zeitpunkt der Herstellung erster Funktionsmuster noch als GR 40 und GR 50 bezeichnet. Vgl. Datenblatt v. 28.02.2001
- 35 06. September 2001
- 36 Unter Frischbetongefüge wird der Zusammenhalt von Zementleim und Zuschlagsstoff verstanden. Bei einem schlechten Frischbetongefüge können Entmischungen, Wasserabsonderungen oder Probleme mit der Verarbeitbarkeit auftreten. Vgl. Kind-Barkauskas et al., 1995, S. 268
- 37 Dem Holzanteil (Siebfraktion 4 mm) mussten noch etwa 1 kg der Siebfraktion 3 mm zugegeben werden.
- 38 10. September 2001
- 39 Genormte Konditionen: 20 °C Temperatur und 65 % Luftfeuchte
- 40 Vgl. Kind-Barkauskas et al., 1995, S. 267
- 41 Nach DIN 1164 darf das Erstarren frühestens eine Stunde nach dem Anmachen beginnen und muß spätestens nach 12 Stunden beendet sein. Kind-Barkauskas et al., 1995, S. 267
- 42 Tel. Auskunft Herr Dr.-Ing. Fieback, Fa. RUBITHERM GmbH, Fürstenwalde, 04.02.2002
- 43 50% Granulatanteil sei kaum unter zu mischen. Tel. Auskunft Herr Dr.-Ing. Fieback, Fa. RUBITHERM GmbH, Fürstenwalde, 06.03.2002
- 44 Dieser Information lägen langjährige Versuchsarbeiten zugrunde. Tel. Auskunft Herr Dr.-Ing. Fieback, Fa. Rubitherm GmbH, Fürstenwalde; 06.03.2002
- 45 Tel. Auskunft Herr Dr.-Ing. Fieback, Fa. RUBITHERM GmbH, Fürstenwalde, 06.03.2002
- 46 Tel. Auskunft Herr Dr.-Ing. Fieback, Fa. RUBITHERM GmbH, Fürstenwalde, 04.02.2002
- 47 Tel. Auskunft Herr Dr.-Ing. Fieback, Fa. RUBITHERM GmbH, Fürstenwalde, 06.03.2002
- 48 Das Paraffin wandert, wenn es nicht ausreichend gebunden ist, aufgrund von Diffusionsvorgängen. Auskunft Herr Dr. Mehling, ZAE Bayern/Abt. 1, Garching; 11.02.2004
- 49 Tel. Auskunft Herr Dr.-Ing. Fieback, Fa. RUBITHERM GmbH, Fürstenwalde; 06.03.2002
- 50 Vgl. Schmidt/Jahns, 2003, o.S.
- 51 Tel. Auskunft Herr Kreher, EPFL/I-Bois, 03.05.2002
- 52 Während die Ausgangsuntersuchungen sehr umfangreich dokumentiert sind (vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 32ff.), liegen für die Herstellung der Probekörper zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität (vgl. Kapitel 5.3.1) keine Protokolle und/oder Aufzeichnungen vor.
- 53 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 29. U.a. Vollenschaar, (Hg.), 25/1998, S. 643; Sell, 4/1997, S. 28
- 54 Tel. Auskunft Herr Tröger, Holzforschung/TU München, 10.04.2002
- 55 Tel. Auskunft Herr Herzig, Fa. Künneth Holz & Logistik KG, Alling/Obb., 09.04.2002
- 56 Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 31
- 57 Der Hinweis ist wichtig, da in anderen Produktionszusammenhängen von Holzwerkstoffen Holzspäne als Zuschlagsstoff durchaus extra angefertigt werden, bzgl. Spanform, Sieblinie etc. Auskunft Herr Hainzinger, Holzforschung/TU München, 02.05.2002
- 58 Auskunft Herr Hainzinger, Holzforschung/TU München, 02.05.2002
- 59 Raumlufttemperatur 20 °C, 65 % Luftfeuchte
- 60 Vgl. im Anhang: Abb. 10.0.1–10.0.3
- 61 Vgl. Kapitel 5.2.3
- 62 Gespräch mit Herrn Dr. Fieback und Herrn Büttner, Fa. RUBITHERM GmbH, Fürstenwalde, 16.08.2001
- 63 Die Arbeiten werden am 13. und 16. Mai 2002 beim Materialprüfungsamt für das Bauwesen (MPA Bau)/TU München durchgeführt.
- 64 Vgl. Bayer/Klose, 10/1996, S. 21-23
- 65 Rostásy, 1983, S. 17
- 66 Vgl. Rostásy, 1983, S. 169
- 67 Vgl. ZAE Bayern, 10/2002; Gespräch mit Herrn Dr. Manara, ZAE Bayern/Abt. 2, Würzburg, 09.10.2003.
- 68 Vgl. auch Abbildung 5.8 in Kapitel 5.3.2
- 69 ZAE Bayern, 10/2002, S. 4f.
- 70 Vgl. Kapitel 5.3.2
- 71 ZAE Bayern, 10/2002, S. 7f.
- 72 ZAE Bayern, 10/2002, S. 8
- 73 ZAE Bayern, 10/2002, S. 11
- 74 Vgl. ZAE Bayern, 10/2002, S. 13
- 75 Vgl. ZAE Bayern, 10/2002, S. 14
- 76 ZAE Bayern, 10/2002, S. 14f.
- 77 ZAE Bayern, 2/2003, S. 3
- 78 Die Durchführung solch aufwändiger Untersuchungen, die über den Kernbereich der Projektziele hinausgehen, konnte nur durch die sowohl inhaltliche wie auch finanzielle Unterstützung der beteiligten Institute, Firmen und Ingenieurbüros realisiert werden.
- 79 Vgl. Kind-Barkauskas et al., 1995, S. 57f., 105
- 80 10. Januar 2003
- 81 20 °C Raumlufttemperatur, 65 % Luftfeuchte
- 82 03. bzw. 16. Juli 2003
- 83 Diese Messreihe aus der Betonage 5 erfolgt um 13 Tage Zeit versetzt; die Rezepturanteile bleiben jedoch gegenüber der Betonage 4 gleich.
- 84 Vgl. Rostásy, 1983, S. 163
- 85 Vgl. Betone mit besonderen Eigenschaften, 06.00/20
- 86 Der ausreichende "Widerstand gegen Frost-Tau-Belastung [...] erfordert eine Prüfmethode, die sowohl eine dargelegte Präzision, d.h. Wiederhol- und Vergleichspräzision, als auch eine ausreichende Korrelation der Prüfergebnisse zum Verhalten des Betons in der Praxis aufweist. Wie in anderen Bereichen auch, z.B. der Festigkeitsprüfung, kann ein Prüfverfahren des Frost-Taumittel-Widerstands nicht alle möglichen praktischen Beanspruchungen erfassen. [...] Der CDF-Test wurde entwickelt, um eine hohe Präzision mit minimalem Kostenaufwand für Ausstattung und Labor zu erreichen." CDF bedeutet "Capillary suction of De-icing solution and Freeze thaw test" (Kapillares Saugen von Taumittellösung und Frost-Tau-Test). Vgl. <http://www.uni-essen.de/lbpmw/cdf/cdfrecde.htm> <15.01.2002>
- 87 Vgl. Auberg <15.08.2003>

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

Zusammenfassung

- <sup>88</sup> CIF bedeutet "Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw test" (Kapillares Saugen, innere Schädigung und Frost-Tau-Test).
- <sup>89</sup> Setzer <15.08.2003>
- <sup>90</sup> Kind-Barkauskas et al., 1995, S. 88
- <sup>91</sup> Gespräch mit Herrn Dr.-Ing. Fieback, Fa. *RUBI-THERM* GmbH, Fürstenwalde, München (Bau 2003), 15.01.2003
- <sup>92</sup> 18. Juli 2002
- <sup>93</sup> Diese Mischung weist mit 23 Masse-% den höchsten PCM-Anteil in der leichten Holzleichtbetonreihe, mit dem niedrigsten Zementgehalt, auf.
- <sup>94</sup> In diesem Zusammenhang wäre die Auswirkung des W/Z-Wertes, d.h. der Feuchteabgabe über die 28 Tage hinaus zu klären.
- <sup>95</sup> Vgl. Schreiben von Dr. Kindermann, Fa. OWA, Amorbach, 28.03.2003
- <sup>96</sup> DIN 4102-15, Mai 1990, S. 2
- <sup>97</sup> Schreiben von Dr. Kindermann, Fa. OWA, Amorbach, den 28.03.2003
- <sup>98</sup> Vgl. DIN 4102-1, Mai 1998, S. 9
- <sup>99</sup> Vgl. Delzer, 06/2003
- <sup>100</sup> Vgl. Rostásy, 1983, S. 44ff.
- <sup>101</sup> Rostásy, 1983, S. 54
- <sup>102</sup> E-Mail, Fa. Delzer Kybernetik, 21.09.2003
- <sup>103</sup> Vgl. Delzer, 09/2003, o.S.
- <sup>104</sup> 22. September 2003
- <sup>105</sup> Zu beachten ist der jeweilige Wechsel der Farbe in den Grafiken, der aus dem Versuchsablauf resultiert; dies wird an dieser Stelle bewusst in Kauf genommen.
- <sup>106</sup> 24. September 2003
- <sup>107</sup> E-Mail, Fa. Delzer Kybernetik, 21.09.2003
- <sup>108</sup> E-Mail, Fa. Delzer Kybernetik, 21.09.2003
- <sup>109</sup> Delzer, 06/2003, S. 2
- <sup>110</sup> 08. Mai 2003
- <sup>111</sup> 19. Mai 2003
- <sup>112</sup> Allerdings ist bei allen Bewertungen der Ergebnisse eine mögliche 5 bis 10 %-ige Fehlerabweichung mit zu berücksichtigen.
- <sup>113</sup> Delzer, 06/2003, S. 2
- <sup>114</sup> Analog zu den vorangegangenen Betrachtungen in Kapitel 5 und 6.
- <sup>115</sup> Vgl. Kruse/Friedrich, 2002; Schossig, 2003, o.S.
- <sup>116</sup> Vgl. Bundesarchitektenkammer (Hg.), 1996, S. 30, 65f.
- <sup>117</sup> Vgl. Pfafferott, 2003, S. 4, 6
- <sup>118</sup> Die "operative Raumtemperatur soll bis zu einer Außen-temperatur von 26 °C zwischen 20 und 26 °C (Komfortbereich: 22 – 25 °C) liegen, bei höheren Außen-temperaturen sind höhere Raumtemperaturen zulässig." Pfafferott, 2003, S. 2
- <sup>119</sup> Vgl. Pfafferott, 2003, S. 2
- <sup>120</sup> Vgl. Schossig, 2003, o.S.
- <sup>121</sup> Vgl. Winkelmüller, 2003, S. 4
- <sup>122</sup> Vgl. Hellwig/Hausladen, 6/2003, S. 82-84
- <sup>123</sup> In Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität bestehen bei den gängigen Baustoffen Unterschiede bis zum Faktor 6 (z.B. zwischen Weichholz und Beton). Vgl. Bundesarchitektenkammer (Hg.), 1996, S. 67
- <sup>124</sup> Vgl. E-Mail, Herr Winkelmüller, ZAE Bayern/Abt. 4, 09.02.2004
- <sup>125</sup> Vgl. E-Mail, Herr Winkelmüller, ZAE Bayern/Abt. 4, 09.02.2004
- <sup>126</sup> Vgl. Winkelmüller, 2003, S. 5
- <sup>127</sup> Vgl. Winkelmüller, 2003, S. 6f.
- <sup>128</sup> Vgl. Winkelmüller, 2003, S. 14
- <sup>129</sup> Knauf: W111 Metallständerwand Einfachständerwerk - einlagig beplankt; Aufbau: Beplankung jeweils 12,5 mm Gipskartonplatten; Metall-Ständer CW 100 / 100 mm; Achsabstand = 62,5 cm; Dämmung = 80 mm; Wandstärke gesamt = 12,5 cm.
- <sup>130</sup> Die Einschränkung von Wandöffnungen auf Fenster erscheint (nicht nur in diesem Zusammenhang) wenig sinnvoll; daher wird nachfolgend stets von der Öffnung gesprochen auch wenn Normen etc. den Terminus Fenster verwenden.
- <sup>131</sup> Vgl. Winkelmüller, 2003, S. 7
- <sup>132</sup> Vgl. Pültz, 2002, S. 142-144; Pfafferott, 2003, S. 8
- <sup>133</sup> Vgl. DIN 1946-2; Bundesarchitektenkammer (Hg.), 1996, S. 29-32
- <sup>134</sup> Vgl. Pültz, 2002, S. 130f.
- <sup>135</sup> Vgl. Winkelmüller, 2003, S. 8-13
- <sup>136</sup> Vgl. Winkelmüller, 2003, S. 13
- <sup>137</sup> Vgl. Winkelmüller, 2003, S. 14f.
- <sup>138</sup> Vgl. Pfafferott, 2003, S. 3
- <sup>139</sup> Vgl. Pültz, 2002, S. 146
- <sup>140</sup> Vgl. Cerliani/Baggenstos, 2000, S. 204f.; Neunast/Lange, 2001, S. 85
- <sup>141</sup> Vgl. Schmidt/Jahns, 2003, o.S. Bei den Speichergranulaten GR 41, GR 54 und höher scheint dieses Problem nicht gegeben.
- <sup>142</sup> Versuche mit Holzbeton-Proben wurden indes im Rahmen der Arbeit nicht mehr durchgeführt.
- <sup>143</sup> Vgl. Schmidt/Jahns, 2003, o.S. Auch bei der Fa. *RUBI-THERM* GmbH wird die Markteinführung einer (Neu-) Entwicklung eines Granulats für raumseitige Anwendungen vorbereitet. Vgl. Datenblatt v. 20.10.2003
- <sup>144</sup> Vgl. Pfeifer, 11/2002, S. 37-44.
- <sup>145</sup> Vgl. Schmidt/Jahns, 2003, o.S.; Koschenz, 11/2003, S. 60-65
- <sup>146</sup> Vgl. Wärmespeicher auf PCM-Basis für die Hausheizungstechnik. In: Tätigkeitsbericht 2001. Würzburg, 2002, S. 25
- <sup>147</sup> Vgl. Kruse/Friedrich, 06/2002, S. 4; Schossig, 2003, o.S.
- <sup>148</sup> Vgl. SOBIC Seminar, 03.12.2003



## 8 Außenwandkonstruktionen mit Holzleichtbeton

In den vorgegangenen Kapiteln konnten die Potenziale des Holzleichtbetons als Material für thermisch passive und aktive Bauteile in unterschiedlichen Zusammensetzungen aufgezeigt werden. Daran anknüpfend erfolgt nun die Darstellung experimenteller Untersuchungen und baulicher Konzepte zu Einsatz- und Gestaltungsmöglichkeiten von Holzleichtbeton in (Außen-)Wandkonstruktionen.

Der Holzbau verzeichnet zum Ausgang des 20. Jahrhunderts eine erneute Prosperität. Trotzdem ist der Marktanteil in Deutschland insgesamt noch relativ gering. Mittlerweile liegt der Holzbau bei den Ein- und Zweifamilienhäusern bei etwa 15 % (2002).<sup>1</sup> Von diesen Bauten werden über dreiviertel in Holztafel- oder Holzrahmenbauweise gefertigt. Insbesondere im mehrgeschossigen Holzbau erreichen jedoch diese Bauweisen hinsichtlich höherer Lasten, Setzungen und Verformungen sowie aufwendiger Fugenausbildung ihre baukonstruktiven Grenzen. In diesem Zusammenhang gewinnen die Massivholzbauweisen an Bedeutung. Mit der Wahl einer Holz-Bauweise wird auch die Art der Gewinnung und Herstellung von Konstruktionshölzern (aus den runden Baumstämmen) wesentlich beeinflusst. Die Hauptproduktausbeute, in der Regel Hölzer mit quadratischen oder rechteckigen Querschnitten, schwankt zwischen 40 % (Blockbau) und 52 % (Rahmenbau). Die restlichen Anteile entfallen auf Nebenprodukte wie Seiten- oder Schwartenbretter.<sup>2</sup> Dieser Anteil kann verstärkt in Massivholzbauweisen und/oder neuen Holz- und Holzverbundwerkstoffen genutzt werden. Darüber hinaus bestehen Möglichkeiten einer stofflichen Verwertung sowohl von Abfallprodukten aus der Holz verarbeitenden Industrie als auch von Durchforstungsmaterial, das in den Wäldern in großen Mengen anfällt.

Im Bereich des Beton-Fertigteilbaus haben Neuerungen in der Produktionstechnologie, der Einsatz von CAD und CAM zu einer Art Paradigmenwechsel geführt. Während früher die Reduktion der Elemente auf möglichst viele gleiche Teile einen wichtigen Planungssparparameter darstellte, sind heute durch die Computer gestützte Fertigung auch (Klein-)Serien mit individuellen Formaten und komplexen Geometrien kein technisches Problem mehr. Die Kombination von (Holzleicht-)Beton mit korrosionsbeständigen textilen Fasern als Bewehrungsmaterial ermöglicht die Fertigung relativ dünnwandiger Bauteile, da nur noch eine geringe konstruktiv notwendige Überdeckung der Bewehrung erforderlich ist.<sup>3</sup> Im Zusammenhang mit der Betrachtung der Stoff- und Energieströme im Bauen gewinnen auch die Kombinationsmöglichkeiten von Beton mit organischen Zuschlagsstoffen an Bedeutung.

Somit bestehen für die Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton gerade im Verbund mit Massivholzkonstruktionen große Entwicklungspotenziale. Daher werden nachfolgend, zum Abschluss der materialspezifischen Arbeiten, prinzipielle (architektonische) Aspekte für eine Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise behandelt.

Außenwand-  
Konstruktionen mit  
Holzleichtbeton

## 8.1 Massivholz-Holzleichtbeton- Verbundbauweise

Der nachwachsende Baustoff Holz war über Jahrhunderte wesentlicher Bestandteil der Primärkonstruktion von Bauten. Erst im Zuge der Entwicklung moderner Materialien in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts, insbesondere Stahlbeton, wird das Material zeitweise in den Hintergrund gedrängt.<sup>4</sup> Durch die Verwendung von Brettstapeln als massive Bauweise, kann Holz in großen Mengen nutzbar gemacht werden, um seinen derzeitigen Anteil am gesamten Bauvolumen von weniger als 5 % wieder anzuheben.

In den Wäldern der BR Deutschland wachsen jährlich 60 Millionen Kubikmeter Holz nach, von denen nur zwei Drittel geerntet werden. Für walddreiche Bundesländer sind massive Bauweisen besonders zukunftsweisend, da durch die Ausnutzung des vorhandenen Naturrohstoffs die Walderhaltung und Aufforstung zusätzlich gefördert und damit die Wertschöpfung der Wälder verbessert werden kann.

Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundkonstruktionen stellen ein enormes (Weiter-)Entwicklungspotenzial im Bereich des innovativen Holzbaus dar. Solche Verbundkonstruktionen führen zu einer erheblichen Verbesserung der statischen und schalltechnischen Eigenschaften von Decken- und Wandbauteilen. Der hohlraumarme Aufbau ermöglicht:

- besseres Wärmespeichervermögen
- ausgeglichenen Feuchtehaushalt und unterbindet die
- "innere" Brandweiterleitung

In Verbundkonstruktionen besteht neben dem Witterungs- und Brandschutz zudem eine Vielzahl von herstellungstechnischen Vorteilen:

- Hoher Vorfertigungsgrad
- Geringes Gewicht
- Einfacher Transport
- Schnelle Montage

Sowohl Vollholzprodukte als auch Holzwerk- und Holzverbundwerkstoffe eröffnen große konstruktive und gestalterische Möglichkeiten. Dabei kommt der Kombination von leistungsfähigen Kompositmaterialien mit innovativer Fertigung als Basis für ausgereifte Bausysteme auch im Holzbau eine enorme Bedeutung zu.

### 8.1.1 Brettstapel

Bei der Brettstapelbauweise<sup>5</sup> (BS) handelt es sich um ein neu aufgegriffenes und weiterentwickeltes Holzbausystem, dessen primäre Tragelemente aus massiven, flächigen, wahlweise sägerauen oder gehobelten Brettstapelelementen bestehen.

Verdübelte Bretterlamellen werden bereits von dem französischen Architekten Philibert De L'Orme verwendet und im 18. Jahrhundert setzt Friedrich Gilly ebenfalls verdübelte Bohlenkonstruktionen ein.<sup>6</sup>

Anfang der 1940er Jahre beschreibt Kress die Brettstapelbauweise als "Rippenbauweise zur Herstellung von massiven Holzwänden".

Ende der 80er Jahre greift Julius Natterer diese Bauweise wieder auf und entwickelt sie weiter. 1991 wird ein erstes Haus, dessen primäre Tragstruktur vollständig aus BS-Holz besteht vorgestellt.<sup>7</sup>

Verwendet werden Brettstapelelemente als Decken-, Wand- und Dach-Bauteile im Einfamilien- und Geschosswohnungsbau, Industrie- und Gewerbebau, Kindergärten, Schulen und Sporthallen sowie für landwirtschaftliche Gebäude; dies gleichermaßen bekleidet oder sichtbar belassen.

Ein großer Vorteil der Brettstapelbauweise ist, dass die Elemente mit geringen Investitionen

nahezu von jedem Zimmereibetrieb herstellbar sind. Ferner können bei detaillierter Planung die Bauteile (bis hin zum gesamten Gebäude) als Bausystem witterungsunabhängig vorgefertigt werden. Dies führt zur Senkung von Risiken und erhöht die Qualität der Ausführung. Ferner lassen sich durch den Einsatz von einfach gehobelten Brettern, raumseitig sichtbaren Flächen und den Wegfall der Verleimung ebenfalls die Baukosten senken.

### Baukonstruktion und Bauphysik<sup>8</sup>

Brettstapelelemente können aus Nadelholz der Sortierklasse S10 nach DIN 4074-1 hergestellt werden und bestehen primär aus Seitenbrettern (GK1.II/III) mit einer Stärke von 24 bis 45 mm. Es handelt sich also um ein Material, das in großen Mengen vorrätig und somit kostengünstig zu beziehen ist.

Nachdem die Bretter oder Bohlen auf eine Holzfeuchte von  $15 \pm 3\%$  getrocknet und zumindest egalisiert sind, werden sie hochkant stehend, dicht an dicht nebeneinander geordnet und durch kontinuierliche Nagelung auf einer Computer gestützten Fertigungsanlage miteinander verbunden. (Abb. 8.1)

Durch die Nagelung beziehungsweise Verdübelung entsteht bei dem Brettstapel "ein beliebig breiter, einachsiger gespannter Holzträger. Die Querverbindung bewirkt die Querverteilung von punktförmigen Lasten und ein kontinuierliches Verformungsverhalten quer zur Spannrichtung der Elemente."<sup>9</sup>

Bei der Durchbiegung sind unter anderem der Grad der Ausgleichsfeuchte, die Art der Stoßanordnungen und gewählten Verbindungsmittel (Nägeln, Bleche oder Holzdübel) zu berücksichtigen.<sup>10</sup>

Wenn die BS-Elemente ausreichend getrocknet eingebaut werden, besteht die Möglichkeit des Verzichts auf chemischen Holzschutz. Im Bereich von Sanitärräumen wird jedoch eine

Abdichtung empfohlen. Bei Kombinationen mit anderen Baustoffen wie Beton und Mauerwerk sind insbesondere die Hirnholzflächen zu schützen.<sup>11</sup>

Brettstapelkonstruktionen weisen eine Reihe bauphysikalischer Vorteile auf. Das thermische Speichervermögen und die guten feuchteregulierenden Eigenschaften der Holzmasse wirken sich positiv auf das Raumklima aus:

- geringere zusätzliche Wärmedämmung
- in den meisten Fällen kann bei sichtbarer raumseitiger Oberfläche auf Dampfbremse oder Dampfsperre verzichtet werden
- große Temperatur-Amplitudenverschiebung

Beim Schallschutz lassen sich reine Brettstapeldecken mit konventionellen Holzdeckenkonstruktionen vergleichen. BS-Beton-Verbunddecken tragen zu einer deutlichen Verbesserung des Trittschallschutzes bei und verhalten sich schalltechnisch etwa wie biegesteife Massivbetonplatten.

Bei einschaligen BS-Wänden wirkt sich der Fugenteil schalltechnisch ungünstig aus. Dies erfordert bei Wohnungstrennwänden eine zweischalige Konstruktion.<sup>12</sup>

#### Decken- und Wandbauteile

Im Wohnungsbau lassen sich bei reinen Brettstapeldecken (d = 12–20 cm) Spannweiten bis zu 6 m erzielen.<sup>13</sup> Die Elemente können bis zu Breiten von 2,40 m entsprechend den Transportmöglichkeiten vorgefertigt werden, sollten aber nicht länger als 12 m sein. Für die statische Bemessung des Aufbaus und der Stärke ist das Schwingungsverhalten der Decke zu berücksichtigen. Brettstapeldecken sind im Vergleich zu Holzdecken und massiven Stahlbetondecken weniger schwingungsempfindlich.<sup>14</sup>

Die Verbindung der einzelnen Deckenelemente muss zum einen die Querverteilung

der Vertikallasten gewährleisten und zum anderen die Scheibenwirkung der Decke sicherstellen. Die Überfaltung scheint für diese Bauweise die sinnvollste Lösung. Zur Übertragung der Schubkräfte können die Elemente zusätzlich mit Stabdübeln oder auf der Oberseite mit Nagelblechen beziehungsweise Holzwerkstoffplattenstreifen verbunden werden.

Der Einsatz von Brettstapелеlementen ermöglicht zum Beispiel im Wohnungsbau gegenüber Mauerwerkskonstruktionen eine Reduktion der Lasten um 20 bis 50 %.

Da Nadelholz in Faserrichtung und Beton C 25/30 in etwa ein gleiches Schwindverhalten aufweisen,<sup>15</sup> eignen sich beide Materialien für Verbundkonstruktionen. Dabei dient der Brettstapel als Schalung für den Aufbeton. BS-Elemente, die schubfest mit dem Beton verbunden sind, können auch für größere Spannweiten zwischen 5 und 10 m (versuchsweise bereits 12 m) eingesetzt werden. Zur Übertragung der Schubkräfte gibt es verschiedene Produkte am Markt.

Für tragende Brettstapelwände (BSW)<sup>16</sup> sind Brettstapelhöhen von 8 bis 12 cm üblich. Im Wohnungsbau müssen die BS-Außenwände in der Regel mit einer zusätzlichen Dämmung versehen werden. Bei raumseitig sichtbaren Oberflächen ist zu beachten, dass durch die

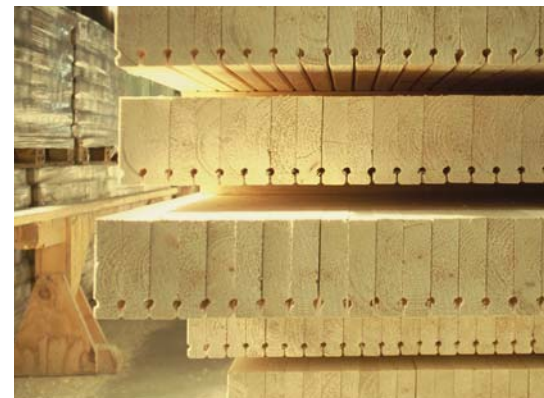


Abb. 8.1 Nagelung der Bretter zum Brettstapелеlement (Fa. Merkle, Bissingen/Teck)

Abb. 8.2 Brettstapелеlement aus so genannten Akustikprofilen

Abb. 8.3 Brettstapelvecke im Restaurant der Messe-Halle 26, Hannover (Arch. Thomas Herzog+Partner, München)

Außenwand-Konstruktionen mit Holzleichtbeton

Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise

Außenwand-  
Konstruktionen mit  
Holzleichtbeton

Holzleichtbeton-  
Massivholz-  
Verbundbauweise

Fugen zwischen den einzelnen Brettlamellen die Dämmung beziehungsweise Trennschicht in direkten Kontakt zur Raumluft steht. Dies erfordert eine Winddichtung zwischen Brettstapel und Dämmung.

Für den raumseitigen Abschluss können die Oberflächen sichtbar belassen werden (sägerau, gehobelt, gestrichen oder unbehandelt) beziehungsweise dienen die Elemente als Tragschale für Ausbaumaterialien.

Gehobelte Brettstapel-Elemente erfüllen auch hohe gestalterische Anforderungen. So bewirkt die Linearität der Brettlamellen die Strukturierung der Flächen, die in unterschiedlicher Weise ausgebildet sein kann. Bei der einfach geschlossenen, scharfkantigen Anordnung, über die gefasteten Varianten bis zu den so genannten Akustikprofilen, wird eine ebene Fläche gebildet. (Abb. 8.2) Durch eine versetzte beziehungsweise verschwenkte Ausbildung lassen sich die Brettlamellen noch deutlicher ablesen. (Abb. 8.3) Hierbei sind vielfältige Variationen in rhythmischen Gestaltungen denkbar, von dichter Belegung im Bereich der Wände zu weiteren Abständen in Raummitte etc.

### 8.1.2 Beton für Außenbauteile <sup>17</sup>

Bei Bauteilen aus Stahlbeton im Außenbereich ist eine Reihe planungs- und herstellungstechnischer Vorgaben zu beachten. Dies betrifft vor allem eine vollständige Verdichtung über den gesamten Querschnitt sowie eine ausreichende Überdeckung der Bewehrung und Vermeidung einer allzu 'feingliedriger' Formgebung sowie die Berücksichtigung konstruktiver Maßnahmen insbesondere für den Feuchtigkeitsschutz.

Allgemein sind Außenbauteile aus Beton in die Expositionsklassen XC4 und XF1 eingestuft. Der verwendete Beton muss die Festig-

keitsklasse  $\geq C25/30$  und einen Wasserzementwert (W/ZWert) von  $\leq 0,60$  bei einem Zementgehalt von  $\geq 280 \text{ kg/m}^3$  aufweisen.

#### Oberflächen

Die Betonoberfläche wird maßgeblich durch die Schalung geprägt, da das plastische Material bis zum Erstarren nahezu jede gewünschte Form annehmen kann.

Der Festbeton hat das Aussehen eines Gesteins und spiegelt an der Oberfläche den Schalungsabdruck wider. Die optischen Wirkungen, die dabei erzielt werden können, sind äußerst vielfältig, von sägerauen Brettern bis zu glatten oder durch Strukturmatrizen gestalteten Oberflächen. (Abb. 8.4+8.5)

Durch Anordnung und Behandlung der Schalungselemente läßt sich eine Vielzahl graphischer Effekte unterscheiden. Gerichtete und ungerichtete, vertikale, horizontale beziehungsweise diagonale Anordnung, flächige Strukturen, die Widerspiegelung von Materialtexturen ebenso wie die Erzeugung von perspektivischen Wirkungen.

Über der materialabhängige Oberflächenstruktur hinaus kann jede Betonoberfläche auch Ornamente erhalten. Allerdings erfordert dies in der Regel aufwendigere Schalungen und ist ein schwierigerer Verarbeitungsvorgang zu beachten.

Neben den Gestaltungsmöglichkeiten der Betonoberfläche durch die Schalung lassen sich die Ansichtsflächen durch Bearbeitung und Behandlung weiter verändern. Beide Verfahren sind prinzipiell zu unterscheiden.

#### Bearbeitung

Durch mechanische, thermische und/oder chemische Bearbeitung der frischen beziehungsweise ausgehärteten Betonoberfläche kann die Farbigkeit der Gesteinskörnung gezielt zur Wirkung gebracht werden und kommt die Farbgebung insgesamt gleichmäßiger zur

Geltung. Die verschiedenen Bearbeitungstechniken sind in der DIN 18500 beschrieben und können auch kombiniert zur Anwendung kommen.

Das häufigste Verfahren ist das Auswaschen, bei dem die oberste Feinmörtelschicht abgetragen wird. An- und aufgeraut wird die Betonoberfläche durch Absäuern und Sand- oder Flammstrahlen. Dagegen entstehen bei der manuellen oder maschinellen, steinmetzmäßigen Bearbeitungsweise (wie Stocken, Spitzen, Scharrieren, Bossieren) neue Oberflächen.

Zur Herstellung von Fertigteilen bestehen weitere mechanische Methoden der Oberflächenbearbeitung. Hier sind herstellungsbedingte Strukturen (Sägen, Spalten, Schleifen) – ohne zusätzliche Maßnahmen – und feine Bearbeitungen (Feinschleifen, Polieren), die zu besonders glatten oder glänzenden Oberflächen führen, zu unterscheiden.

Die bearbeitete Betonoberfläche wird bis zu 80 % durch die Farbigkeit der Gesteinskörnung geprägt. Den restlichen Anteil beeinflusst die Farbe des Zements beziehungsweise die der Feinstanteile und eingemischten Pigmente.

#### Behandlung

Die Möglichkeiten des Auftrags verschiedener Schichten aus Silanen, Siloxanen oder Acrylaten dienen zur Hydrophobierung, Beschichtung oder Versiegelung der Oberfläche.

In der Regel weisen Behandlungen, die dekend oder lasierend ausgeführt werden können, nur eine zeitliche begrenzte Dauerhaftigkeit auf. (Abb. 8.6)

#### Farbigkeit

Darüber hinaus bestehen unterschiedliche Formen zur farblichen Akzentuierung während der Betonherstellung.<sup>18</sup> Dies kann erfolgen durch Verwendung von

- Zementen mit besonderer Farbwirkung (Weiß- oder Portlandölschieferzement)
- Gesteinskörnungen mit besonderer Farbwirkung (roter Granit, Carrara Marmor)
- Pigmenten (unter anderem Eisenoxidgelb, Chromoxidgrün)

Das Erscheinungsbild wird zunächst durch die Zementfarbe beeinflusst. Ein relativ hoher Eisenoxidgehalt führt zu dem dunkleren Grauton des Portlandzements, Anteile von Ölschieferabbrandt beim Portlandölschieferzement zu einem rötlichen Ton. Insgesamt erzeugt die Verwendung von grauem Zement gedecktere und dunklere Farbtöne, während Weißzement die Farben heller und reiner erscheinen lässt.

Die Farbigekeit der Gesteinskörnung wird erst durch eine Oberflächenbearbeitung wirksam. Da die Korngröße in Abhängigkeit von der Bearbeitung zu unterschiedlichen Intensitäten führt, ist besonders bei schalungsglatten Flächen auf eine gleichmäßige Verteilung von Mehlkorn- und Feinstsandanteilen zu achten. Leichte Oberflächenprofilierungen verstärken die Farbwirkung. Die Einfärbung von Beton ist dauerhaft und witterungsbeständig.



Abb. 8.4 Glatte Betonoberfläche, Betonplanschalung, grauer Zement

Abb. 8.5 Industrieschalung, Reckli-Strukturschalung 2/30 Havel, weißer Zement

Abb. 8.6 Holzbretterschalung; Oberfläche mit transparenter Lasur, Mineralfarbe

## 8.2 Farbige und strukturierte Oberflächen

Die Kombination von (Holzleicht-)Beton mit Massivholzbauweisen weist neben den eingangs genannten funktionalen und konstruktiven Vorteilen, ein großes Repertoire an Gestaltungsoptionen auf.

Daher ist es ein wichtiges Anliegen dieser Arbeit, neben den Konzepten für Aufbauten und Schichtenfolgen auch die besonderen Möglichkeiten der farblichen Gestaltung und der plastischen Ausprägung von Holzleichtbetonoberflächen exemplarisch aufzuzeigen. Diese experimentellen Arbeiten konnten ebenfalls beim Materialprüfungsamt für das Bauwesen (MPA Bau) der Technischen Universität München durchgeführt werden.

### 8.2.1 Farbmuster (Betonage 3)

Aus der Vielzahl an farblichen Variationen muss zunächst eine Vorauswahl getroffen werden. Von den existierenden Pigmenten können im Zement nur diejenigen eingesetzt werden, die im Zementleim und im Zementstein chemisch stabil bleiben und auch bezüglich Witterungs- und Umwelteinflüssen inert sind.<sup>19</sup> Auch können die Kosten einen wichtigen Faktor darstellen.

Von den gängigen farblichen Zusätzen sind zu unterscheiden

- Eisenoxide (gelb, rot, anthrazit, braun, orange)
- Kohlenstoff (tiefschwarz)
- Chromoxidgrün, Titandioxid (weiß)
- Mischoxid (Kobaltblau, auch Kobaltspinell oder Kobaltaluminiumoxid genannt)

Gegenüber Eisenoxiden<sup>20</sup> können die Kosten etwa um den Faktor 2 (Titandioxid) und 3 (Chromoxidgrün) differieren, bei Kobaltblau gar bis zum 20-fachen. Im Regelfall werden für einen 'gesättigten' Farbton Dosierhöhen

Außenwand-  
Konstruktionen mit  
Holzleichtbeton

Farbige und  
strukturierte  
Oberflächen

Außenwand-  
Konstruktionen mit  
Holzleichtbeton

Farbige und  
strukturierte  
Oberflächen



zwischen 2 und 5 %, bezogen auf den Bindemittelgehalt, empfohlen. Bei Verwendung von Weißzement wirken die Pigmente brillanter und farbstärker, weil der Grauteil des Portlandzementes fehlt. Wird der Anteil der Farbpigmente etwa halbiert (0,5–2 %) führt dies in Kombination mit Weißzement zu mehr pastellartigen Farben.<sup>21</sup>

Daraus resultiert eine Einschränkung auf Rot- und Gelbtöne, beides kostengünstige und problemlos verfügbare Additive. Diese spiegeln auch eine spezifische Farbigkeit des Holzleichtbetons und seiner in diesen Versuchsarbeiten verwendeten Zuschläge wider. Hinsichtlich der Oberflächenwirkung wird mit einer gestuften Zunahme der farblichen Intensität eine starke Konturierung eines der Zuschlagmaterialien erwartet.

Für die kleine Versuchsreihe, in der neben der Verarbeitung auch der erforderliche Anteil für eine Farbsättigung zu untersuchen ist, werden die Schalungsformen wieder genutzt. Mittels der Möglichkeit der Unterteilung stehen für jede Farbgruppe sechs Musterplatten mit den Abmessungen 290 x 290 mm zur Verfügung. Ausgehend von einem (Zement-) Masseanteil von 5 % werden zusätzlich jeweils Mischungen mit 2 und 8 % aufgestellt, um das Maß der Farbintensität und das Wechselspiel mit der Eigenfarbe der Zuschlagmaterialien besser beurteilen zu können.

Abb. 8.7 Bemessung der Flüssigfarbe ...

Abb. 8.8 ... und Zugabe in den Frischbeton

Abb. 8.9 Schalungen mit den gelben (8 Masse-%) und roten (8, 5, 2 Masse-%; v.l.) Musterplatten

Vorab muss zudem geklärt werden, inwieweit Farbpigmente oder Flüssigfarbe zum Einsatz kommen. Pigmente haben den Vorteil größerer Farbintensität, lassen sich jedoch bei gestuften Beimischungen in den Frischbeton nicht mehr wirksam verarbeiten.

Bei Flüssigfarbe gilt es indes zu beachten, dass diese in der Regel bei saugenden, das heißt nicht vorbehandelten organischen Zuschlägen nicht eingesetzt wird, da dies zur Einfärbung sowie Umhüllung des Holzpartikels führen kann.<sup>22</sup>

Für die experimentellen Arbeiten stellt erster Gesichtspunkt kein (gestalterisches) Hemmnis dar, jedoch bleibt zu beobachten, inwieweit die Verarbeitbarkeit und der Verbund innerhalb der Zementleimmatrix möglicherweise dadurch beeinträchtigt wird. Aufgrund der 'gestuften' Vorgehensweise wird Flüssigfarbe eingesetzt.

Die Arbeiten im Rahmen der Betonage 3 umfassen zunächst die Herstellung von Prüfmustern der leichten Rezeptur III und schweren Rezeptur VI, so dass anknüpfend an die jeweilige Mischung die Herstellung einer Farbreihe<sup>23</sup> erfolgt: (Abb. 8.7)

- Rezeptur III mit Flüssigelb HS 420 F
- Rezeptur VI mit Flüssigrot HS 110 F

Die Vorgehensweise erfolgt in drei Schritten. Nach Herstellung der Grundmischung und Entnahme der erforderlichen Betonage für die Prüfmuster, wird der restliche Frischbeton gewogen und anschließend der Anteil an Flüssigfarbe in den Abstufungen 2, 5, 8 % bezogen auf die Gesamt(Rest)Masse errechnet.<sup>24</sup> Zu berücksichtigen ist, dass einerseits die Prozentangaben deutlich über vergleichbaren Mischungsansätzen auf Basis des Zement-Masseanteils liegen; andererseits summieren sich die Mischzeiten nach Farbzugabe (je Arbeitsschritt etwa 3 Minuten) für die nachfolgenden Rezepturen doch merklich auf.

Aus dem Wasseranteil der jeweiligen Flüssigfarbe resultiert ferner ein Multiplikator zur Errechnung des Masseanteils.<sup>25</sup>

Die Versuchsreihen erfolgen aufgrund der größeren Betonage für die Musterplatten mit einem mittleren Zwangsmischer (100 l) der Firma Zyklus. (Abb. 8.8) Nach jeder Mischung werden jeweils zwei Schalungsfelder befüllt.<sup>26</sup> (Abb. 8.10+9.11)

Analog der Herstellung von Betonage 2 wird zu Beginn der Arbeiten eine vereinfachte Überprüfung des Wassergehalts im Frischbeton (500 g) von Rezeptur III vorgenommen. Nach dem 'Auskochen' und dem anschließenden wiegen (266 g) der Probe lässt sich die Gesamtwassermenge bestimmen. Der Wert von 88 % liegt aufgrund der erhöhten Wasserzugabe um etwa ein Drittel über der bei Betonage 2 ermittelten nicht gebundenen Feuchte U.

An der ersten roten Mischungen (Rezeptur VI / 2 %) wird die Konsistenz mittels des Ausbreitmaßes untersucht. Mit 40 cm liegt der Wert knapp unter der (Regel-)Konsistenz C3/F3. Da in zwei weiteren Arbeitsschritten Flüssigfarbe hinzu kommt, wird auf eine weitere Wasserzugabe verzichtet. Darüber hinaus werden keine Untersuchungen von Frischbetoneigenschaften durchgeführt. Bei der Herstellung des Holzleichtbetons zeigt sich, dass dieser mit der Farbzugabe eher plastischer, steifer wird. Das überrascht, da mit der Flüssigfarbe ein weiterer Wasseranteil (50 % bei rot/ 40 % bei gelb) dem Frischbeton zugeführt wird. Möglicherweise lässt sich dies mit den längeren Mischzeiten begründen, die zusätzlich zur Steigerung des Farbanteils auch noch zu einem höheren Sättigungsgrad führen können.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse die bisherigen Einschätzungen hinsichtlich der Her-

stellung von Holzleichtbeton. Das Material lässt sich gut verarbeiten, aber der Einfluss des Zugabewassers und der Mischzeiten ist schwierig abzuschätzen. Der W/Z-Wert liegt bei beiden Versuchsreihen jeweils 80 % über der Basismischung. Hierin spiegelt sich der erhöhte Wasseranspruch des deutlich trockeneren Holzzuschlags (Feuchte < 10 % gegenüber > 110 % Betonage 2) wider.

Darüber hinaus wird ein gleichermaßen großes wie interessantes Gestaltungspotenzial sichtbar. In beiden Reihen lässt sich aufgrund der Zunahme der Farbsättigung, die bei den roten Mustern intensiver ausfällt, eine stärkere Akzentuierung des jeweils andersfarbigen Zuschlagsstoffs erkennen, das heißt beim gelben Holzleichtbeton treten die Holzpartikel in den Hintergrund, während das Speichergranulat deutlicher betont wird und umgekehrt. Trotzdem entsteht durch diesen Effekt keine einheitliche Angleichung. Das angeschnittene PCM-Material weist eine Vielzahl unterschiedlicher Schattierungen auf und auch das Holz bleibt in beiden Farbreihen gestalterisch wirksam. (Abb. 8.11+8.12)

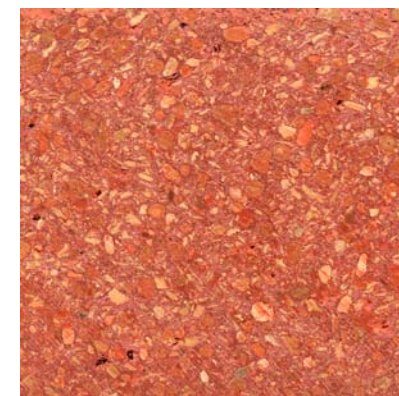
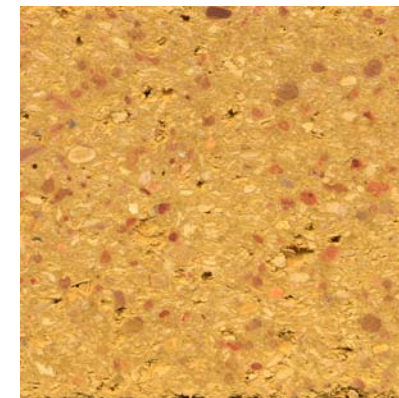
### 8.2.2 Strukturschalungen (Betonage 4)

Anknüpfend an die Arbeiten zu farbigem Holzleichtbeton sollen in einer abschließenden Versuchsreihe die Optionen hinsichtlich plastischer Oberflächengestaltungen mit Holzleichtbeton untersucht werden.

Abb. 8.10 Farbige Musterplatten nach dem Ausschalen

Abb. 8.11 Rezeptur III (5 % Farbe Gelb) (Darstellung 1:1)

Abb. 8.12 Rezeptur VI (5 % Farbe Rot) (Darstellung 1:1)



Außenwand-Konstruktionen mit Holzleichtbeton

Farbige und strukturierte Oberflächen

Außenwand-  
Konstruktionen mit  
Holzleichtbeton

Farbige und  
strukturierte  
Oberflächen

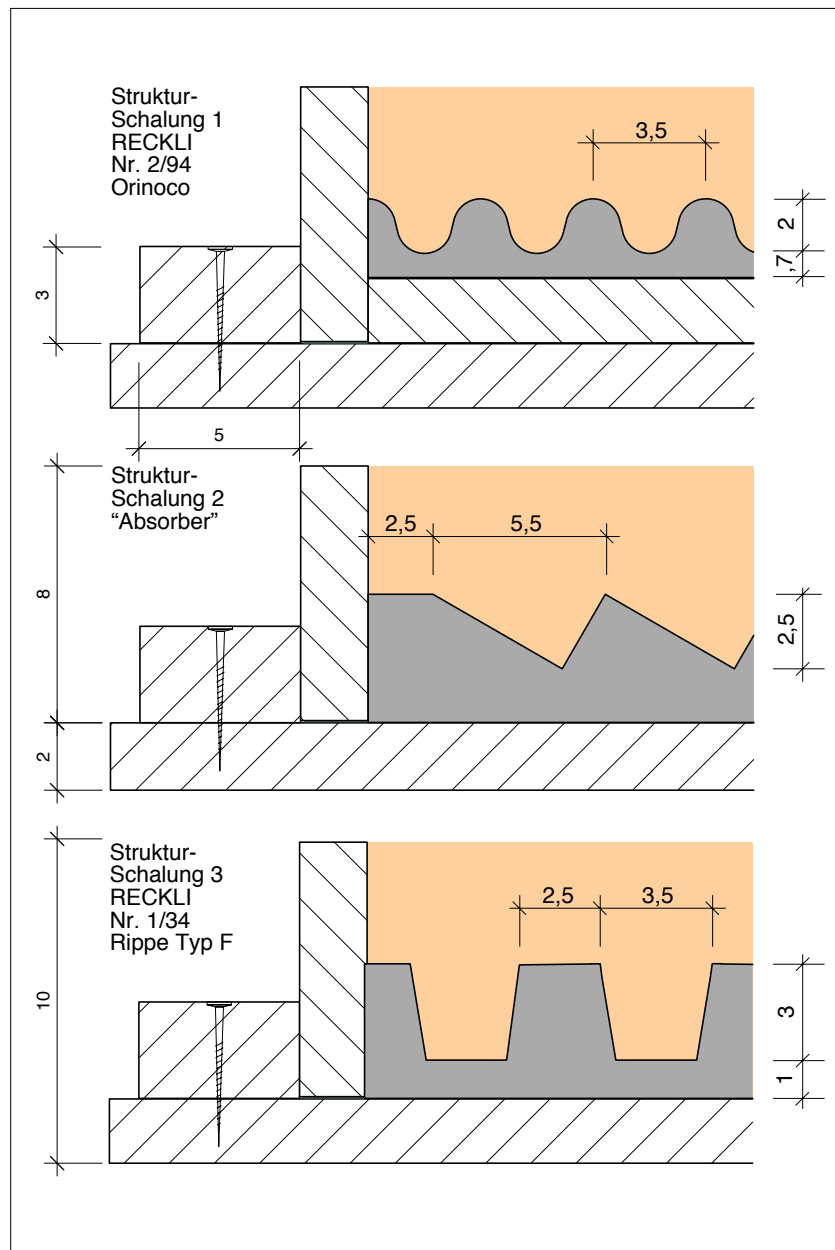


Abb. 8.13 Zeichnungen der Schalungsformen mit den Strukturformen

Hierbei gilt zu berücksichtigen, dass in den bisherigen Mischungen keine weiteren Additive eingesetzt wurden und dass insbesondere bei leichtem Holzleichtbeton möglicherweise Probleme mit einer dichteren Oberfläche bestehen.

#### Vorbereitung und Herstellung der Mischungen

Für diese Untersuchungen werden die drei Schalungsformen vorbereitet. Einerseits sollen mittels zweier elastischer Schalungsmatrizen der Fa. Reckli-Chemiewerkstoff 'gerundete' sowie 'scharfkantige' Formen hergestellt werden

- Strukturschalung "Welle"/Reckli #2/94
- Strukturschalung "Rippe"/Reckli #1/34

Andererseits wird mit einer im Technischen Zentrum der Fakultät für Architektur angefertigten Holzschalung

- Strukturschalung "Absorber"

eine strukturierte Oberfläche für eine Art Solarabsorber<sup>27</sup> angestrebt. (Abb. 8.13–8.15)

Für die Arbeiten soll weitgehend auf bereits getestete Mischungen zurückgegriffen werden. Daher wird eine leichte und eine schwere Rezeptur mit unterschiedlichen PCM-Zuschlägen ausgewählt. Als Ausgangsrezeptur wird auf eine 'reine' Holz-Zement-Mischung zurückgegriffen, da im Zusammenhang mit den bisherigen Arbeiten keine Erfahrungswerte vorliegen.

Dies ermöglicht einerseits den Vergleich mit Ergebnissen, die an der EPF Lausanne/l-Bois ermittelt wurden, andererseits kann so eine Referenzprobe zu den HLB-PCM-Rezepturen angefertigt werden.

Von den acht hergestellten Mischungen der Betonage 2 werden für die Funktionsmodelle zwei (Rezeptur III  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$  sowie Rezeptur VI  $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ ) ausgewählt. Beide stellen einen guten Mittelwert der untersuchten Reihen dar.



Für die Mischungen wird wieder ein Portlandzement (CEM I 32,5R) verwendet und das Holz aus den Resten der bereits verwendeten 'Chargen' genommen, die in einem 'diffusionsoffenem' Sack lagerten. Die im Trockenschrank ermittelte Holzfeuchte beträgt 7,53 %. Diese liegt damit um etwa 23 % niedriger als bei den vorangegangenen Versuchsreihen.<sup>28</sup> Bezüglich des Wasseranteils werden zunächst die Werte der Betonage 2 zugrunde gelegt.

Für die Auswahl der jeweiligen Strukturschalung werden Rohdichte und Verarbeitbarkeit im Vorfeld mit einbezogen. Die leichteste Mischung 1 für die "Welle", die Kombination der Ausgangsmischung mit PCM (Mischung 2) für den "Absorber" und für die relativ tiefe "Rippe" die schwerste, die Mischung 3, um eine gute Verteilung und Ausprägung eines scharfkantigen Profils zu gewährleisten.

#### Betonieren und Ausschalen <sup>29</sup>

Insgesamt muss festgestellt werden, dass bei allen Mischungen der Wasseranteil zu erhöhen war. Während bei der Mischung 1 für das erforderliche Ausbreitmaß zusätzlich nur etwa 5 % ausreichen, fällt dieser bei den Mischungen 2 und 3 deutlich höher aus, verdoppelt sich bei Mischung 2 und verdreifacht sich bei der dritten Mischung.

Dies führt bei den Mischungen mit PCM zu einer 'guten' plastischen Konsistenz, wobei sich bereits bei der Herstellung des Ausbreitmaßes zeigt, dass der Frischbeton stark 'blutete'. Die Differenz zwischen den Festteilchen und den Wasserrändern beträgt teilweise über 3 cm. (Abb. 8.16)

Die Mischzeit beträgt in der Regel 1 Minute nach der Trockenmischung sowie 2 Minuten im Anschluss an die Wasserzugabe. Auf Zugabe von Fließmitteln sowie ein Verdichten mittels Rütteltisch wird zunächst verzichtet.

Bei der Mischung 1 zeigt sich, dass nach dem Mischen mit den berechneten Massenanteilen der Zuschlagsstoffe das Ausbreitmaß mit 34 cm deutlich unter der Konsistenzklasse (C3/F 3) liegt. Im Unterschied zu Normalbetonen verfügt jedoch der frische Holzleichtbeton noch über eine ausreichende Plastizität. Durch die längere Pause im Zuge der Herstellung des Ausbreitmaßes, der Zugabe von weiteren 4,7 % Wasser, und einer nochmaligen Mischphase von etwa 2 Minuten, wird bereits das erforderliche Ausbreitmaß – wenn auch mit 43 cm im unteren Bereich – erreicht. Somit scheint die Mischdauer beim Holz-Zement-Wasser-Gemisch eine wesentliche Einflussgröße darzustellen.<sup>30</sup>

Mit einem W/Z-Wert von 1,24 liegt die Mischung 1 weit über den für Holzleichtbeton als günstig erachteten Bereich von 0,55 bis 0,65. Allerdings zeigen die Druckfestigkeitswerte eine große Nähe zu den Ergebnissen der EPF Lausanne/I-Bois.

Die beiden nachfolgenden Durchgänge zeigen die bereits mehrfach genannten Probleme mit dem Wasseranteil. Bei Mischung 2, mit dem grobkörnigen Speichergranulat GR 41, erfolgt in vier Arbeitsschritten á 2 kg eine gute Verdoppelung (Gesamt-mischzeit > 5 min). Der daraus resultierende W/Z-Wert von 1,72 liegt nochmal um 20 % über dem Vergleichswert aus Betonage 3.

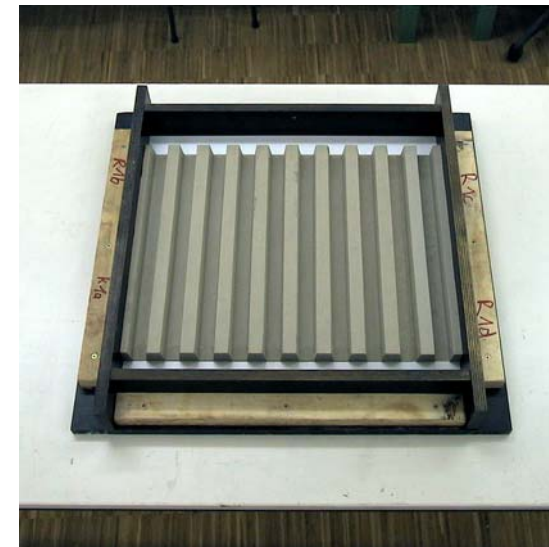
Zunächst ermöglicht die Mischung 3 eine Variation hinsichtlich der Farbzugabe. Neben dem pulverförmigen PCM-Material GR 54 wird 5 % Farbe (Flüssigrot HS 110 F), bezogen auf den Zementmasseanteil untergemischt. Die Farbzugabe erfolgt erst nach der Bestimmung der Regelkonsistenz (44 cm). Auch in diesem Fall erhöht sich der W/Z-Wert mit 1,08 um knapp 20 %.

Hinsichtlich des Sättigungsgrades und der Farbintensität ist indes gegenüber den Ver-



Abb. 8.14 Zusammenbau der so genannten Strukturschalung "Absorber" (aus Holz)

Abb. 8.15 Strukturschalung, Schalungsmatrize "Rippe Typ F", der Fa. Reckli #1/34



Außenwand-  
Konstruktionen mit  
Holzleichtbeton

Farbige und  
strukturierte  
Oberflächen

Außenwand-  
Konstruktionen mit  
Holzleichtbeton

Farbige und  
strukturierte  
Oberflächen



gleichmustern der Betonage 3 kein nennenswerter Unterschied festzustellen. Die Oberfläche wirkt auch durch das feine Zuschlagsmaterial insgesamt dichter.

Zu Messzwecken werden darüber hinaus von der Mischung 1 drei Prüfwürfel (15 x 15 x 15 cm) sowie von den Mischung 1 und 2 jeweils drei Prismen für Schwindversuche hergestellt.

Beim Ausschalen, (Abb. 8.17) drei Tage nach der Betonage, sind insbesondere bei der Schalung 1 (Welle) große Probleme im Bereich der Oberfläche festzustellen. Bei der leichtesten Mischung ohne PCM-Material, treten eine Vielzahl an Fehlstellen in der Oberfläche auf. (Abb. 8.18)

Da beim Einbringen des Betons in die Schalungsformen, bis auf manuellen 'Druck' mit der Kelle, keine weiteren Verdichtungsmaßnahmen vorgenommen werden, und man auf Zusatzmittel insgesamt verzichtet, sollen in einem abschließenden Arbeitsschritt einige Optimierungsmaßnahmen diskutiert und umgesetzt werden.

Bei den anderen beiden Funktionsmodellen, die unter den gleichen Herstellungsbedingungen entstanden, sind sehr gute Oberflächen erzielt worden. Insbesondere Mischung 3 mit der farbigen Rippenstruktur zeigt in großen Teilen eine hervorragende Sichtbetonfläche.

Abb. 8.16 Ausbreitmaß der Mischung 2 ("Absorber") zeigt deutlich das 'Bluten' des Frischbetons

Abb. 8.17 Ausschalung des farbigen Funktionsmodells "Rippe" (Mischung 3)

Abb. 8.18 Abnahme der elastischen Schalungsmatrize "Welle" (Mischung 1)

### 8.2.3 Einsatz von Fließmitteln<sup>31</sup>

Als Bilanz der Arbeiten zu den strukturierten Oberflächen (und nach Rücksprache mit Fachleuten) ist festzustellen, dass der Versuch, ohne Beton-Zusatzmittel hochwertige Sichtbetonoberflächen herzustellen, eher 'unüblich' ist. Ziel sind normalerweise homogene und sehr dichte Oberflächen. Dazu werden feine Mischungen benötigt, zum Beispiel versetzt mit Glas- oder Propylenfasern. Damit kann zum einen Beton plastischer verarbeitet und auch das Frühschwinden reduziert werden. Zum anderen dienen die Zusatzmittel zur Erhöhung der Eigenfestigkeit. Darüber hinaus kann der Einsatz von Farbpigmenten zu einer stärkeren 'Zähigkeit' des Betons führen.

#### Trocken- vs. Nassmischungen

In den bisherigen Versuchen wurden ausschließlich Trockenmischungen vorgenommen: Die Hauptbestandteile Holz und Zement zugegeben und gemischt, danach erfolgte die Zugabe des Speichergranulats, und nach einer weiteren Mischphase die errechnete Wassermenge. Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frisch-Holzleichtbetons ist jedoch auch eine Nassmischung denkbar.

Hierbei wird dem Holz im Mischer ein gewisser Anteil des Zugabewassers beigegeben. Je nach Eigenfeuchte kann dieser Anteil bei Leichtbetonen etwa 30 % betragen. Der Wert darf nicht zu gering angesetzt werden, da sonst 'Verklumpungen' der Holzpartikeln auftreten können. Auch sind gegebenenfalls längere Mischzeiten notwendig.

Aus diesen Überlegungen resultiert folgende Vorgehensweise:

- Etwa 30 % der errechneten Wassermenge mit dem Holz mischen (1 Minute),
- den Zementanteil hinzugeben (ebenfalls 1 Minute mischen),
- das restliche Wasser soweit zugeben bis eine ausreichende Plastizität<sup>32</sup> gegeben ist

- anschließend das Fließmittel (1 bis 2 Minuten Mischzeit) zuführen

Für spätere Potenzialabschätzungen erscheint die Kenntnis des Wassergehalts im Fertigbeton interessant, um zu prüfen, inwieweit sich gegebenenfalls die Masseverhältnisse ändern. Allgemein kann gesagt werden, dass beim Gesamtvolumen keine Veränderung eintritt, das heißt an Stelle des Wassers entstehen Luftporen. Indes verschieben sich die Anteile bei dem Zementleim. Genauere Angaben lassen sich jedoch nicht ermitteln, man geht aber von etwa 3 bis 6 % Wasseranteil im ausgehärteten Beton aus.

#### Zum Verdichten

Bei Sichtbetonqualitäten stellt der Anteil des Zementleims eine wichtige Einflussgröße dar. Ein zu geringer Anteil kann zu 'Fehlstellen' führen. Ist der Anteil zu hoch, besteht unter Umständen die Gefahr der Bildung von Schwindrissen. Ein Hauptaugenmerk stellt jedoch die Art des Verdichtens, und damit einhergehend der Anteil der Luftporen dar. Daher ist insbesondere bei Strukturschalungen auf zweierlei zu achten:

- Partielles, stufenweises Verdichten per Hand
- Einsatz von Rütteltischen beziehungsweise Rüttelplatten

Partielles Verdichten heißt, dass die tiefer liegenden Bereiche der Strukturschalung beziehungsweise der Schalungsmatrize zunächst befüllt werden, dann maschinell und anschließend per Hand (bei der verwendeten Form der Welle zum Beispiel mit Holzleisten oder Rundstählen) verdichtet werden. Anschließend werden die flächigen Bereiche – gegebenenfalls in zwei Schichten – aufgefüllt und ebenfalls maschinell und per Hand verdichtet.

#### Fließmittel

Von den Betonzusatzmitteln sind zunächst Fließmittel (FM) und Betonverflüssiger (BV) zu unterscheiden.

Betonverflüssiger weisen in der Regel eine längere Wirkungszeit auf, zum Beispiel den Beton über mehrere Stunden 'weich' zu halten – erforderlich besonders bei Transportbetonen – und vergrößern die Konsistenzklasse des Frischbetons um eine Stufe zum Beispiel von C2/F2 auf C3/F3 oder von C1/F1 auf C2/F2.

Demgegenüber wirken Fließmittel nur eine knapp begrenzte Zeit, abhängig von der Temperatur etwa eine halbe Stunde. Daher sind sie vor allem für den Bereich der Fertigteilherstellung gut geeignet, überbrücken jedoch zwei Konsistenzklassen, und ermöglichen Ausbreitmaße von 50 bis 60 cm (F4 bis F5). Neu dagegen sind Fließmittel auf Polycarboxylatetherbasis (PCE). Diese hochleistungswirksamen Fließmittel oder "Superverflüssiger"<sup>33</sup> werden bei der Herstellung selbstverdichtender Betone eingesetzt und kombinieren die Vorteile von Betonverflüssigern und Fließmitteln; sie weisen ebenso lange Wirkungszeiten wie Betonverflüssiger auf.<sup>34</sup>

Beide Betonzusatzmittel weisen häufig einen Farbbereich von tiefbraun bis honiggelb auf. Allerdings sind farblose Fließmittel mittlerweile am Markt verfügbar, die eine Beeinträchtigung der Farbwirkung zu verhindern. Eingesetzt werden Fließmittel unter anderem bei:

- (Früh-)Hochfestem Beton
- Selbstverdichtendem Beton
- Wasserundurchlässigem Beton
- Beton mit hohem Frost-/Frosttaumittelwiderstand
- Sichtbeton
- Leichtbeton
- Beton mit geringem Feinkornanteil

Die Verwendung von Fließmittel bewirkt eine bessere Dispergierung des Zements, verringert die Reibungskräfte zwischen Zement und Zuschlagsstoff sowie verringert den Wasseranspruch. Der W/Z-Wert<sup>35</sup> kann bei gleicher Verarbeitbarkeit (deutlich) reduziert oder eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons bei gleichem Wasseranteil erzielt werden.

Durch die geringere Entmischungsneigung wird der Beton homogener und die Früh- und Endfestigkeit sowie die Dauerhaftigkeit erhöht. Ferner kann das Schwind- und Kriechverhalten gesenkt und können insgesamt verbesserte Sichtbetonoberflächen erzielt werden.<sup>36</sup>

Bei den Arbeiten zeigt sich, dass (zumindest bei den kontaktierten Firmen)<sup>37</sup> wenige bis gar keine Erfahrungen bei der Verwendung von Fließmitteln im Zusammenhang mit organischen Zuschlagsstoffen bestehen. Nach Rücksprache und ersten Einschätzungen kann davon ausgegangen werden, dass die Art des Fließmittels keinen negativen Einfluss auf die Mischung und deren Bestandteile hat. Bei der Vielzahl von Produkten ist zu berücksichtigen, dass zum Beispiel manche Fließmittel Tendenzen zur Entmischung aufweisen (Naphtalin), andere wie Polycarbonat-'Ester', "gutartig" reagieren, Entmischungstendenzen unterbinden und dem Frischbeton eine honigartige Konsistenz verleihen. Für die vorgenommene Auswahl bildet letztlich die organische Zusammensetzung des Fließmittels den ausschlaggebenden Faktor.

Die Versuchsmischungen werden mit einem FM für hochwertigen Beton mit Melaminsulfonat als Hauptwirkstoff durchgeführt, da von der gelben, fast durchsichtigen Farbigkeit keine negativen Auswirkungen auf die Oberflächen erwartet werden. (Abb. 8.19+8.20)<sup>38</sup>

Außenwand-  
Konstruktionen mit  
Holzleichtbeton

Farbige und  
strukturierte  
Oberflächen

Außenwand-  
Konstruktionen mit  
Holzleichtbeton

Farbige und  
strukturierte  
Oberflächen

	Merkmale und Kennwerte
Produktname	Fließmittel FM F
Farbe und Form	gelbe Flüssigkeit
Hauptwirkstoff	Melaminsulfonat
Dichte (20 °C)	1,12 g/cm <sup>3</sup>
Feststoffgehalt	20,0 %
pH-Wert	8 bis 11
Chloridgehalt	< 0,1 %
Alkaligehalt (Na <sub>2</sub> O-Äquivalent)	< 5 %
empfohlener Dosierbereich	0,2 bis 3,4 % vom Zementmasseanteil

Abb. 8.19 Technische Daten  
(Gemäß DIN EN 934-2, Tab. 1)

Abb. 8.20 ... des verwendeten Fließmittels



Große Unterschiede bestehen bei den Herstellerangaben hinsichtlich der Bewertung von Dosierung und Mischzeit. Gängige Werte zwischen 0,2 und 2 %, in besonderen Fällen über 3 % vom Zementmasseanteil, erfordern eigene Versuchsreihen, um einen geeigneten, exakten Anteil zu ermitteln.

Insgesamt erscheint es daher sinnvoll, sich von kleinen Zugabemengen (unverdünnt, beginnend mit einem Prozent, dann jeweils in weiteren Halb- oder Ganz-Prozentschritten) heranzutasten. Weist der Frischbeton nach der Zugabe noch keine ausreichende Plastizität auf, kann man sukzessive nachdosieren und das Fließmittel untermischen.

Das Fließmittel soll nie direkt nach dem Holz zugegeben werden, da es so durch die saugende Wirkung des Holzes dem Beton weitgehend entzogen wird, sondern mit dem Zugabewasser oder kurz danach. Bezüglich der Mischzeit gibt es ebenfalls keine genauen Vorgaben. Allerdings wird ein Minimum von 60 bis 90 Sekunden empfohlen. Bei späterer Zugabe und Nachdosierungen soll das Mischen mindestens 5 Minuten betragen, um eine ausreichend gleichmäßige Verteilung des Fließmittels im Beton zu gewährleisten. Die Verwendung von Fließmitteln erfordert insgesamt eine rasche Verarbeitung des verflüssigten Betons, da die Wirkung nur eine begrenzte Zeit vorhält.

#### 8.2.4 Herstellung der modifizierten Mischungen (Betonage 5)

Im Rahmen der Arbeiten konnten erste Erfahrungen zum Einsatz von Fließmitteln bei Holzleichtbeton-Mischungen gesammelt werden. Um die Zahl möglicher Einflüsse zu reduzieren und die Strukturoberfläche aus Betonage 4 zu verbessern, erfolgt die modifizierte Rezeptur anhand der Mischung 1.<sup>39</sup>

Bei der Mischung 1 (FM) wird erstmals im Rahmen der Versuche der Mischvorgang von der Trockenmischung auf eine Nassmischung umgestellt. Dem Holz wird zunächst 30 % (3,30 Liter) des Zugabewassers beigegeben und etwa 1 Minute gemischt. Das Wasser ist danach komplett aufgesogen; die Späne fühlen sich leicht feucht an.

Anschließend erfolgt die Zugabe des Zements und in mehreren Stufen, zunächst 30, dann weitere 20 % des Wassers. Bei der Mischung ist eine Tendenz zum 'Verklumpen' festzustellen. Da der Frischbeton noch keine ausreichende Plastizität aufweist, werden die restlichen 20 % des ursprünglich berechneten Zugabewassers beigegeben. Da der Effekt des Fließmittels nicht einzuschätzen ist, wird auf den zusätzlichen halben Liter, um den der Wasseranteil bei den vorangegangenen Mischungen erhöht werden musste, verzichtet.

Wie bereits zuvor beobachtet, setzt nach der längeren Mischzeit und der nachmaligen Wasserzugabe nahezu 'sprunghaft' ein Konsistenzwechsel ein. Der Holzleichtbeton wird auf einmal sehr weich. Um die Plastizität zu erhöhen kommt nun 1 % des Fließmittels hinzu, was den Frischbeton zunächst 'sämig' und 'geschmeidig' werden lässt. Allerdings bleibt das ermittelte Ausbreitmaß mit 31 cm (C1/F1) sehr deutlich unter den Erwartungen. Nun wird in zwei Schritten der Anteil des Fließmittels auf 3 % erhöht. Allerdings muss festgestellt werden, dass der Beton zunehmend dichter wird und schließlich 'in sich zusammenfällt'. (Abb. 8.21) Ein weiteres Ausbreitmaß kann nicht mehr ermittelt werden.

Somit bleibt festzustellen, dass bei diesem Versuch weder der Wasseranteil gesenkt, noch die Verarbeitbarkeit verbessert werden konnte. Inwieweit dies eventuell mit der gewählten Nassmischung zusammenhängt, das

heißt dass dem Beton nicht ausreichend Wasser zur Verfügung steht, muss in künftigen Versuchsreihen geklärt werden. Auffällig ist indes, dass die Verarbeitbarkeit des Holzleichtbetons sehr raschen Veränderungen unterliegt, und vor allem von der Mischzeit stark abhängig ist.

Der zweite Versuch erfolgt wieder in Trockenmischung. Nach Zugabe der berechneten Bestandteile wird 1 % des Fließmittels eingefüllt und etwa drei Minuten untergemischt. Auch hier zeigt sich nach der anfänglich positiven Einschätzung der Konsistenz, dass sich der Holzleichtbeton rasch 'verfestigt'. Bereits nach zwei Schlägen sackt die Probe auf der Arbeitsplatte in sich zusammen. Überraschend ist dennoch, dass das Ausbreitmaß mit 32 cm sehr dicht an dem Wert der vorher gemessenen Mischung (31 cm) liegt. Dies würde dafür sprechen, dass die Art der Mischung doch eher von nachgeordnetem Einfluss ist. Statt weiter Fließmittel beizugeben wird nun der Wasseranteil in zwei Halbliter-Schritten erhöht. Nach einer Mischzeit von insgesamt etwa 10 Minuten kann nun eine gute Verarbeitbarkeit erreicht werden, was der deutliche Anstieg des Ausbreitmaßes auf 46 cm belegt. Es deutet darauf hin, dass die Zugabe von chemischen Additiven zu einer Reihe von schwer zu beurteilenden Einflüssen in dem Holz-Zement-Wasser-Gemisch führt.

Luftporengehalt und Frischbetonrohichte werden mit einem kleinen Luftporentop<sup>f40</sup> bestimmt. Hierbei zeigt sich erneut der Einfluss der Verdichtung. So liegt der Wert der ausschließlich 'geschockten'<sup>41</sup> Probe mit 0,784 kg/dm<sup>3</sup> nur bei etwa 80 % der eingerüttelten<sup>42</sup> Probe (0,982 kg/dm<sup>3</sup>). Das verweist auf einen hohen Luftporenanteil, der mit ermittelten 30 % auch den höchsten Wert der gesamten

Holzleichtbeton-Rezepturen darstellt. Die Beschickung der Strukturschalung erfolgt ebenfalls in zwei Schichten. Vor dem Einfüllen wird der Frischbeton noch einmal etwa 30 Sekunden gemischt, dann eine erste Lage bis zur kompletten Deckung der Schalungsmatrize eingebracht. Die gesamte Schalung wird zwei mal zehn Sekunden auf die Rüttelplatte gesetzt. Anschließend erfolgt noch eine Nachverdichtung per Hand und danach der Vorgang noch einmal wiederholt.

(Abb. 8.22)

Dabei zeigt sich, dass beim zweiten Schritt kaum mehr aufsteigende Luftporen sichtbar werden, was auf einen guten Grad an Verdichtung schließen lässt. Gleichwohl erfolgt das Abziehen der Oberfläche, aufgrund der bisherigen Erfahrungen, dass der Holzleichtbeton nach dem Befüllen sich noch setzt, erst etwa eine Stunde später.

Vergleicht man beide Funktionsmodelle mit der Strukturschalung "Welle", ist eine deutlich dichtere Oberfläche bei Betonage 5 festzustellen. (Abb. 8.23) Gleichwohl bleibt das Ergebnis dieser leichten Ausgangsmischung in der Qualität hinter den beiden strukturierten Oberflächen der Mischungen 2 und 3 aus der Betonage 4 zurück.

Inwieweit das verbesserte Resultat allein auf die intensivere Verdichtungsarbeit zurückzuführen ist, oder ob auch ein positiver Effekt

Abb. 8.21 Nach Zugabe von 3 % Fließmittel fiel der Frischbeton 'in sich zusammen'

Abb. 8.22 Verdichtung der Strukturschalung per Hand und mit Rütteltisch

Abb. 8.23 "Welle" (Ausschnitt) mit deutlich verbesserter Oberfläche (Mischung 2)



Außenwand-Konstruktionen mit Holzleichtbeton

Farbige und strukturierte Oberflächen



Abb. 8.24 Holzleichtbeton-Oberflächen mit Weißzement (EPFL/I-Bois, 2000)

des eingesetzten Fließmittels bilanziert werden kann, müssen spätere Versuchsreihen zeigen. Auch ist gerade bei gummiartigen Schalungsmatrizen die richtige Handhabung von geeigneten Trennmitteln wichtig. Bei allen Strukturschalungen wird ein Produkt des Matrizen-Herstellers eingesetzt. Die Inaugenscheinnahme der Schalungsmatrize vor allem nach dem ersten Versuch mit der "Welle", lässt aufgrund von Materialresten darauf schließen, dass beim Holzleichtbeton aufgrund seiner porösen, saugenden Oberfläche mit einem erhöhtem Auftrag gerechnet werden muss.

### 8.2.5 Fazit

Mit diesen experimentellen Arbeiten sind über die baukonstruktiven und bauphysikalischen Materialprüfungen hinaus, auch wesentliche gestalterische Aspekte zum Holzleichtbeton untersucht worden.

Die angefertigten Funktionsmodelle lassen ein großes Spektrum beim Holzleichtbeton erkennen. Sowohl hinsichtlich der Farbgebung bestehen vielfältige Optionen, wie auch Experimente unter anderem mit Weißzement (Abb. 8.24) an der EPF Lausanne/I-Bois zeigen, als auch im Bereich von strukturierten Oberflächen.

Allerdings erfordert gerade die Arbeit mit Schalungsmatrizen beziehungsweise an feingliedrigen plastischen Formen einen höheren Anteil an Feinststoffen im Bereich der Holzleichtbetonoberfläche. Dies bestätigt sich beim Funktionsmodell "Rippe". Die schwere Mischung mit einem größeren Zementanteil und der Einsatz von Flüssigfarbe führen zu einer dichten Oberfläche.

Hinsichtlich der Bearbeitungsmöglichkeiten bestehen beim Holzleichtbeton aufgrund des porösen Gefüges Einschränkungen. Im Rahmen der Versuchsarbeiten wurden die Oberflächen in erster Linie gesägt und geschliffen.

Das Beispiel des Fließmitteleinsatzes zeigt, dass gerade die Arbeit mit Betonzusatzmitteln besondere Anforderungen an das Holz-Zement-Wasser-Gemisch stellt. Welchen Einfluss W/Z-Wert und Mischzeit auf die Wirkung von Fließmitteln nehmen, bedarf einer hinreichenden Überprüfung in späteren Versuchsreihen.

### 8.3 Wandaufbauten

Nach umfangreichen Untersuchungen zu funktionalen, konstruktiven und gestalterischen Eigenschaften von Holzleichtbeton, werden Aufbauten und Schichtenfolgen von Außenwandkonstruktionen in der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise abschließend vorgestellt und erörtert.

Dabei spiegeln sich in den mehr konzeptionellen Arbeiten noch einmal die im Rahmen der experimentellen Arbeiten vorgenommenen Betrachtungsebenen von Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden. Für das Material lassen sich primär Einsatzmöglichkeiten unterscheiden für

- thermisch passive Bauteile
- thermisch aktive Bauteile

Darüber hinaus besteht die

- Kombination mit Latentwärmespeichermaterialien

insbesondere bei raumseitiger Anordnung. Diese prinzipiellen Anwendungsformen lassen sich in verschiedenen Aufbauten mit unterschiedlichen Schichtenfolgen 'realisieren'. (Abb. 8.25)

Bei den gewählten Wandaufbauten wird zunächst eine funktionale Trennung zwischen Lastabtragung und Wärmedämmung sowie Wärmespeicherung vorgenommen. Bei Holzleichtbeton als statisch beanspruchbares Bauteil ( $\rho > 1500 \text{ kg/m}^3$ ) beträgt der Holzmasseanteil weit unter 10 %. Mit der erhöhten Dichte steigt die Wärmeleitfähigkeit und nimmt der Wärmeschutz deutlich ab. Daher ist zur Lasttragung eine massive Holzschicht – in den nachfolgenden Beispielen Brettstapelelemente – vorgesehen. Hierbei werden die Vorteile der Massivholzbauweise,

hohe Traglasten unter vertikaler und horizontaler Beanspruchung aufnehmen zu können, genutzt.

In den mehrschichtigen Wandaufbauten übernimmt der Holzleichtbeton als passives Bauteil Wärme dämmende und speichernde Funktionen und kann darüber hinaus auch als thermisch aktives Bauteil zur Unterstützung der Brauchwassererwärmung oder Kühlung eingesetzt werden. (Abb. 8.26)

Mögliche Bauteilschichten:

Holzleichtbeton als Material für thermisch passive Bauteile

- (Abdeckung, zum Beispiel Glas, glasfaserverstärkter Kunststoff)
- Holzleichtbeton
- zusätzliche Dämmung, zum Beispiel Weiße (Holz-)Faserplatte, "Climate Chips"
- Brettstapel
- (Holzleichtbeton)

Holzleichtbeton als Material für thermisch aktive Bauteile

- Abdeckung, zum Beispiel TWD, Einfachglas
- Holzleichtbeton
- Brettstapel

Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien

- (Abdeckung, zum Beispiel Glas, glasfaserverstärkter Kunststoff)
- Holzleichtbeton
- (zusätzliche Dämmung, zum Beispiel Weiße (Holz-)Faserplatte, "Climate Chips")
- Brettstapel
- Holzleichtbeton mit PCM

Bei der prinzipiellen Anordnung des Holzleichtbetons bestehen jedoch einige funktionale und gestalterische Besonderheiten (auch gegenüber 'konventionellen' Massivholzkonstruktionen), die in einer ersten Beurteilung hinsichtlich der Lage, einiger Vorteile wie

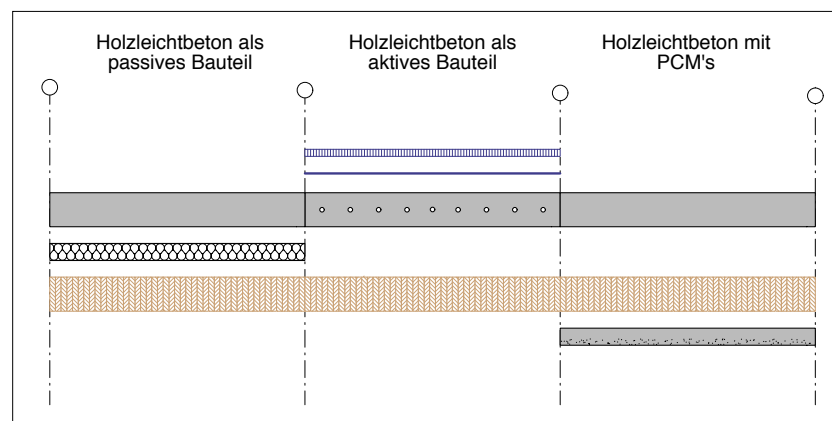


Abb. 8.25 Mögliche Bauteilschichten für die unterschiedlichen Wandaufbauten

auch einiger Einschränkungen in der Funktionsweise zusammengefasst sind. Insbesondere im Zusammenhang mit der Verlegung von Installationen sind Konsequenzen für die Anordnung der Schichten zu beachten.

Dabei steht eine sichtbare Verwendung des Holzleichtbetons beziehungsweise der Massivholzschiene, sowohl im Bereich der Außenwand wie auch raumseitig im Vordergrund der Überlegungen:

- Holzleichtbeton "außen dämmend" Außen angeordnet, sichtbar, direkt bewittert oder mit unterschiedlichen transparenten beziehungsweise transluzenten Abdeckungen. Raumseitig Brettstapel mit sichtbar belassener Holzfläche.
- Holzleichtbeton "außen mit Kerndämmung" Anordnung wie oben, jedoch zusätzliche Dämmebene, die auch zur Aufnahme von Installationsführungen dienen kann.
- Holzleichtbeton "außen dämmend, innen speichernd" raumseitig sichtbar angeordnet, mit der Möglichkeit einer guten Anpassung an

Abb. 8.26 Funktions-Schichten der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise:  
- Brettstapel (BS), Lastabtragung  
- Holzleichtbeton (HLB), Wärme dämmung und -speicherung

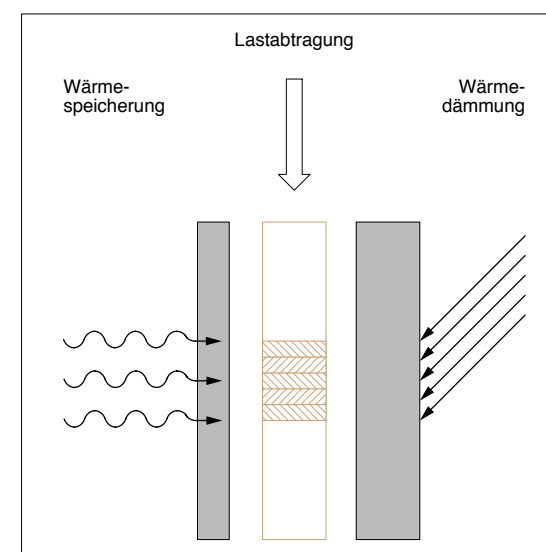




Abb. 8.27 Zweischichtiger Aufbau, BS + HLB  
(außen)

Abb. 8.28 Dreischichtiger Aufbau, HLB (innen) +  
BS + HLB (außen)



raumklimatischen Erfordernisse. Außen wie oben

Insgesamt stellen sichtbar belassene Wandoberflächen immer hohe konstruktive und gestalterische Anforderungen an die Ausbildung der Fügungspunkte. Hierzu steht indes ein breites Produkt- und Systemspektrum zur Verfügung.

Zwei wichtige Randbedingungen sind bei den Wandaufbauten zu erfüllen: Mit Außenwandstärken von  $\leq 30$  cm müssen die Mindestanforderungen des Wärmeschutzes, das heißt U-Werte  $\leq 0,5$   $\text{W/m}^2\text{K}$  (WSVO 1995) erreicht werden. Bei den untersuchten Aufbauten werden neben Brettstapelementen (Nadelholz) die zwei Holzleichtbeton-Ausgangsmischungen ( $\rho \approx 600$   $\text{kg/m}^3$ ,  $\rho \approx 1250$   $\text{kg/m}^3$ ) mit den unterschiedlichen Rohdichten eingesetzt. Überschlägige Berechnungen von mehrschichtigen Wandaufbauten (U-Werte zwischen  $0,45$  und  $0,33$   $\text{W/m}^2\text{K}$ ) in Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise lassen auch thermisch ausreichendes Potenzial als passive Außenwandkonstruktion erkennen. (Abb. 5.12)

Der einfachste Aufbau besteht aus einer Brettstapel-Schicht als tragendes Element sowie außenliegend einer leichten, dämmenden Holzleichtbeton-Schicht von jeweils  $15$  cm. Mit diesem Aufbau werden die gestellten Mindestanforderungen hinsichtlich des Wärmeschutzes (U-Wert  $0,45$   $\text{W/m}^2\text{K}$ ) bereits erreicht. (Abb. 8.27)

Hiervon ausgehend, erfolgen unterschiedliche Optimierungen. Zunächst erscheint die Bauteilminimierung als wichtige Maßnahme. Der Zwischenschritt mit Holzleichtbeton als außenliegender dämmender Schicht ( $12$  cm) sowie einem Brettstapelement von ebenfalls  $12$  cm, lässt durch den fast dreifach so hohen  $\lambda$ -Wert der wärmespeichernden, raumseitig

angeordneten Schicht ( $6$  cm) jedoch keine Verbesserung hinsichtlich des Wärmeschutzes erkennen. Indes zeigt die durchgeführte Potenzialabschätzung<sup>43</sup>, dass bei diesem Wandaufbau der Holzleichtbeton als Speichermasse wirksam werden kann. (Abb. 8.28) Zur Verbesserung des Wärmeschutzes werden weitere, dreischichtige Aufbauten betrachtet. Zwischen der Brettstapel- und Holzleichtbetonschicht, jeweils  $12$  cm, kann eine zusätzliche (Kern-)Dämmung ( $6$  cm) angeordnet werden. Als organisches Material dienen vorbehandelte Holzspäne, sogenannte "Climate Chips"<sup>44</sup>, das heißt obwohl ebenfalls auf Holzbasis entwickelt, kann damit der  $\lambda$ -Wert um den Faktor  $3$  auf  $0,05$   $\text{W/mK}$  verbessert werden. Mit solchen Außenwandkonstruktionen lässt sich der U-Wert ( $0,33$   $\text{W/m}^2\text{K}$ ) um nahezu  $40$  % reduzieren. Werden die drei Schichten jeweils mit Dicken von  $10$  cm ausgeführt, verbessert sich der Wärmeschutz um weitere  $15$  % auf einen U-Wert  $0,28$   $\text{W/m}^2\text{K}$ . (Abb. 8.29)

Holzleichtbeton kann ebenfalls in mehrschichtigen und/oder mehrschichtigen Konstruktionen mit konventionellen, hinterlüfteten (Holz-)Bekleidungen als Witterungsschutz beziehungsweise raumseitigem Abschluss verwendet werden.

Da das Material, obwohl mit sehr offener Struktur, eine hohe Witterungsbeständigkeit aufweist, darüber hinaus durch das organische, feinkörnige Zuschlagsmaterial ästhetisch reizvolle Oberflächen ermöglicht, die mit weiteren Zusätzen noch akzentuiert werden können, eignet sich der Holzleichtbeton im besonderen Maße für sichtbare Anwendungen. Die Aufbauten können je nach Anforderung, zum Beispiel bei der Ausführung als thermisch aktives Bauteil mit Gläsern oder TWD abgedeckt beziehungsweise mit transluzenten Materialien wie Polycarbonat-Doppel-





Abb. 8.29 Dreischichtiger Aufbau, BS + zusätzliche Dämmung + HLB (außen)

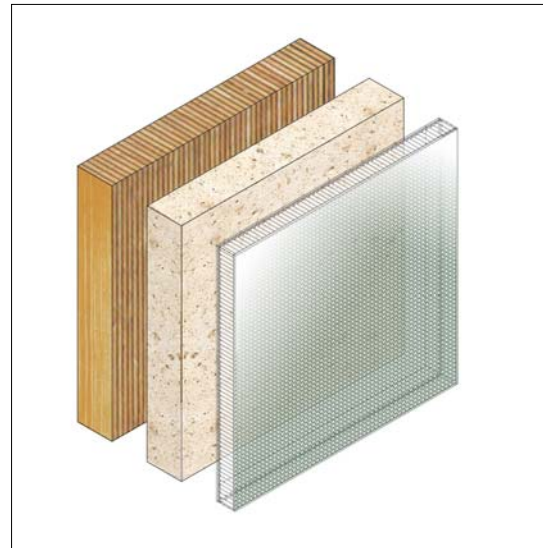


Abb. 8.30 Dreischichtiger Aufbau, BS + HLB + TWD-Abdeckung

Abb. 8.31 Dreischichtiger Aufbau, BS + HLB (z.B.) als Massivabsorber + Glasabdeckung

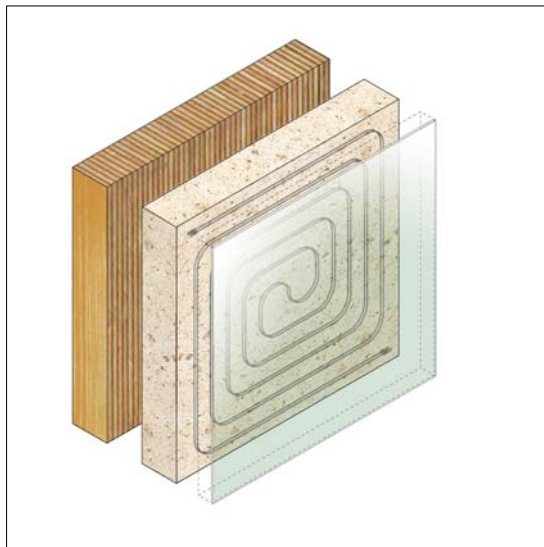
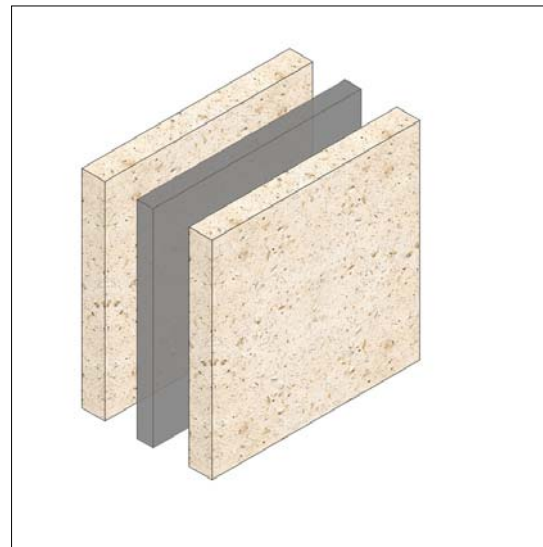


Abb. 8.32 Dreischichtiger Aufbau, HLB (innen) + Vakuum-Isolierpanel + HLB (außen)



stegplatten kombiniert werden. (Abb. 8.30+8.31)

Darüber hinaus sind ebenfalls im Bereich nichttragender Außenwände auch Aufbauten mit hoch Wärme dämmenden Schichten, wie Vakuumisulationspaneelen (VIP) denkbar. Das sind plattenförmige Elemente, die bei minimaler Dicke eine bisher nicht erreichte, extrem hohe Wärmedämmung bieten. Die Wärmeleitfähigkeit der VIP beträgt nur etwa ein Zehntel des Wertes herkömmlicher Dämmmaterialien (ca. 0,004 W/mK im Vergleich zu ca. 0,040 W/mK). Somit kann ein 2 cm dünnes Vakuumisulationspaneel bis zu 20 cm dicke Schaumstoff- oder Mineralfaserpakete ersetzen. (Abb. 8.32)

Die skizzierten Aufbauten gewinnen ebenfalls an Bedeutung im Zusammenhang mit der Betrachtung von Luftkollektoren und Hypokaustensystemen. Bei diesen Außenwandaufbauten wird vor eine massive Wand eine Verglasung angeordnet. Im Wechselspiel von Solarstrahlung, Speichermassen, Luftraum und Verglasungsart sind mit solchen Konstruktionen in der Gesamt-, das heißt Jahresbilanz thermisch leistungsfähige Gebäudefassaden zu realisieren, die weit über das Maß hinausgehen, das eine 'statische' Betrachtung eines U-Werts erwarten lässt. Darüber hinaus bestehen Kombinationsmöglichkeiten mit einer Hypokaustenheizung, das heißt die solar erwärmte Luft "kann bei richtiger Anwendung ... durch Unterdruck in den Boden/die Wand geleitet werden" und sorgt so für eine Grundtemperierung von Gebäuden.<sup>45</sup>

Außenwand-Konstruktionen mit Holzleichtbeton

Wandaufbauten



## 8.4 Zusammenfassung

Zwei Tendenzen bestimmen zurzeit den innovativen Holzbau:

- Verstärkter Einsatz in mehrgeschossigen Bauten und in städtischen Bebauungen
- Kombination mit Glas und anderen transparenten beziehungsweise transluzenten Materialien

Dabei ist eine fast 'paradigmatische' Neuausrichtung des industrialisierten Holzbaus zu verzeichnen, von stabförmigen Elementen zu scheibenförmigen Bauteilen.<sup>46</sup>

Gerade in mehrgeschossigen öffentlichen wie privaten Wohn- und Verwaltungsbauten besteht ein großes Potenzial, Massivholz und/oder Holzverbundwerkstoffe auch in großen Mengen einzusetzen.

Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweisen verknüpfen baukonstruktive und bauphysikalische Vorteile mit einem hohen Grad an Vorfertigung und einer guten Bilanz hinsichtlich der Stoff- und Energieströme. (Regionale) Holzarten sind im Vergleich zu vielen technischen Materialien gleichermaßen ein kostengünstiger Roh- und Zuschlagsstoff. Auch ein Argument für Holzleichtbeton und Massivholz,

Abb. 8.33 'Außenwandbaukasten' (60 x 60 cm): Dreischichtiger Aufbau, BS + zusätzliche Dämmung + HLB "Welle" (außen)

Abb. 8.34 Dreischichtiger Aufbau, BS + zusätzliche Dämmung + HLB "Absorber" (außen)

Abb. 8.35 Vierschichtiger Aufbau, HLB (innen) + BS + zusätzliche Dämmung + HLB "Rippe" (außen)

bei denen auch weniger qualitative Hölzer oder Reststoffe zu leistungsfähigen Bauteilen verarbeitet werden können.

Für ein Holzhochhaus in Zürich, im Rahmen eines Planungsgutachtens entwickelt und vorgestellt,<sup>47</sup> bilden diese Aspekte den programatischen Prospekt. Für die Grundstruktur des Gebäudes sind zwei Funktionsbereiche, Wohnen nach Süden und Verwaltung nach Norden, definiert worden. Das Haupttragwerk ist als Stahlskelett konzipiert, mit Geschosdecken aus Stahlbetonfertigteilen. Das Konzept sieht innerhalb dieser Brandabschnitte für die Wohn- und Büroteile jeweils dreigeschossige Holzkonstruktionen vor, deren Decken und tragende Wände in Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise geplant sind.<sup>48</sup> Das Projekt zeigt in anschaulicher Weise, unter Nutzung vor allem der verbesserten thermodynamischen Stoffeigenschaften, die vielfältigen und erweiterten architektonischen Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton. (Abb. 8.33-8.36)

Die Kostenentwicklung im Bauwesen bewegt sich, im Gegensatz zu anderen Industriebereichen, besonders bedingt durch hohe Lohnkosten, sowie fehlende Rationalisierungsmaßnahmen, auf einem hohen Niveau. Daher muss bei der Entwicklung von (Außen-)Wand- und Decken-Konstruktionen mit Holzleichtbeton der Weg zum großformatigen Wandelement besprochen werden.

Für die genannten Aufbauten lassen sich Verbindungsmittel wie auch Fügeverfahren sowohl aus dem Ingenieur-Holzbau als auch dem Bereich der Betonfertigteilerherstellung nutzbar machen. Gerade neue Produkte wie der an der Technischen Universität München entwickelte "Innovative Schnellverbinder"<sup>49</sup> für Geschosshohe Elemente, eröffnen auch der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise ein großes Anwendungsgebiet.

Beim Holzbau sind in Deutschland in den letzten Jahren eine Reihe hoch entwickelter Vorfertigungsmethoden erfolgreich eingeführt worden. Die produktionstechnische Leistungsfähigkeit sowie die architektonischen Potenziale der Beton-Fertigteilindustrie zeigen sich auch im Bereich des Wohnungs- und Verwaltungsbaus in Veröffentlichungen aus den letzten Jahren.<sup>50</sup> Die intelligenten Verknüpfung beider Arbeitsfelder lässt vielfältige Synergieeffekte erkennen.

### Anmerkungen

- <sup>1</sup> Bei einem Gesamtvolumen von etwa 165.000 Einfamilienhäusern (1996), entfallen nur etwa 21.000 auf den Bereich der Holzbauweise.
- <sup>2</sup> Vgl. Kolb, 2/1992, S. 38
- <sup>3</sup> Vgl. Gliniorz/Natterer, 2000, S. 90-131
- <sup>4</sup> Im Vergleich zu heute wird um 1900 in Mitteleuropa etwa die 10fache Menge an Massivholz in der Baukonstruktion eingesetzt.
- <sup>5</sup> Vgl. Bauen mit Holz, 5/1997, S. 324f.; Natterer, 6/1997, S. 9f.
- <sup>6</sup> Jung, 5/1998, S. 18
- <sup>7</sup> Vgl. Schaal et al., 1/1997, S. 20
- <sup>8</sup> Vgl. Schaal et al., 1/1997, S. 20-29; Natterer, 6/1997, S. 9f.
- <sup>9</sup> Vgl. Natterer, 6/1997, S. 9
- <sup>10</sup> Vgl. Schaal et al., 2/1997, S. 89  
Nagelschema und Querkraftübertragung sowie Ausbildung von Stößen vgl. Schaal et al., 1/1997, S. 24ff.
- <sup>11</sup> Vgl. Schaal et al., 2/1997, S. 89f.
- <sup>12</sup> Vgl. Schaal et al., 2/1997, S. 90
- <sup>13</sup> Für eine Spannweite von 5 m und einer angenommenen Last von 3,0 KN/m<sup>2</sup> wird eine Brettstapelhöhe von 16 cm benötigt.
- <sup>14</sup> Vgl. Schaal et al., 2/1997, S. 89
- <sup>15</sup> Vgl. Braun et al., 8/1998, S. 542
- <sup>16</sup> Bis zu 2 Stockwerken, sind Wandstärken von 8 cm erforderlich; ab drei Stockwerken und je nach dem Grad des Fensteranteils erhöht sich der Aufbau. Nichttragende Innenwände werden mit d = 8 cm ausgeführt. Zur Verbesserung des Schallschutzes sind diese einseitig zu beplanken.
- <sup>17</sup> Vgl. Kind-Barkauskas et al., 1995. S. 53-73; Fassaden aus Stein, 2004, 2-57; Merkblatt Sichtbeton, 1997
- <sup>18</sup> Durch den so genannten "Nasseffekt" kann die Farbigekeit des Beton verändert werden.
- <sup>19</sup> Vgl. DIN EN 12878, Dezember 2003
- <sup>20</sup> Eisenoxide ca. 2 €/kg, für Pulverpigmente; für Flüssigtypen reduziert sich der Preis entsprechend dem

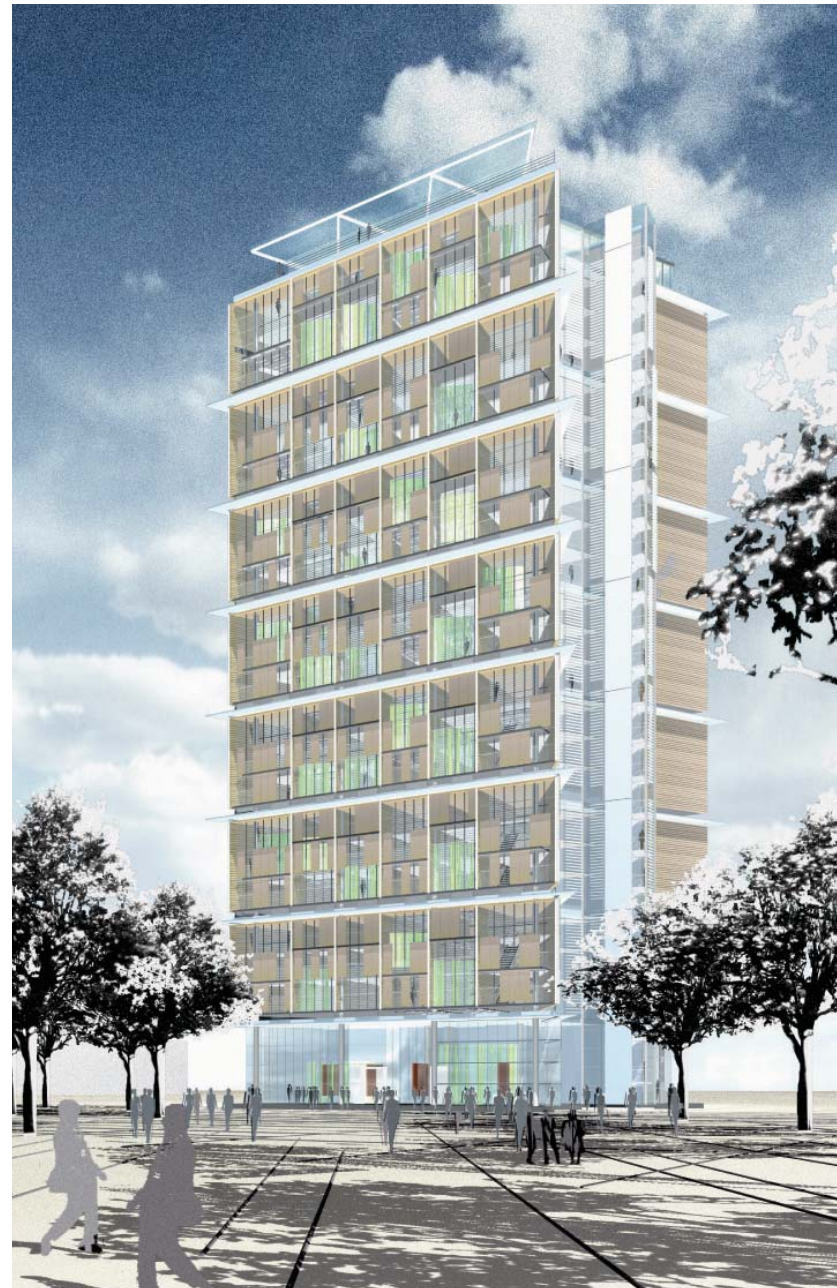


Abb. 8.36 Hochhaus in Holz. Planungsgutachten für Zürich (2002)  
(Architekten: Thomas Herzog mit Matthias Sieveke)

- Feststoffgehalt.
- 21 Vgl. E-mail, Herr Dr. Weber, Chem. Fabrik Harold Scholz GmbH, Lohr, 04.02.2004; Besprechung mit Herrn Heeß und Herrn Dr. Kling am Lehrstuhl, 18.12.2001
- 22 Dies trifft nur bei Trockenmischungen zu.
- 23 Die Flüssigfarbe wird von der Fa. Chem. Fabrik Harold Scholz GmbH in Lohr zur Verfügung gestellt
- 24 Der Bezug der Dosierhöhe auf die Gesamtmasse ist eher nicht üblich, wird jedoch bei der Mörtel- und Putzherstellung durchaus angewandt.
- 25 Flüssiggelb HS 420 F, Faktor 2; Flüssigrot HS 110 F, Faktor 1,67, Tel. Auskunft Herr Dr. Weber, Chem. Fabrik Harold Scholz GmbH, Lohr, 16.12.2002
- 26 10. Januar 2003
- 27 Vgl. zur Formfindung: Sieveke, 2000, S. 53f.
- 28 Holzeinwaage feucht: 500 g; Holzeinwaage trocken: 465 g
- 29 07. bzw. 13. Juli 2003
- 30 Hierbei wäre zu klären, inwieweit nach der Ummantelung des Spans, der Frischbeton 'blutet', d.h. eine Sättigung erfährt
- 31 Gespräch mit Herrn Krauß, MPA Bau/TU München, 08.07.2003
- 32 Der Frischbeton sollte bereits die erforderliche 'Homogenität' aufweisen, ohne bereits eine zu steife Konsistenz zu haben, ein schwieriges Unterfangen, dass Erfahrung routinierter Betonfacharbeiter braucht.
- 33 Vgl. Kolczyk/Rings <09.07.2003>
- 34 Haben eine honigartige Konsistenz und weisen ein 'tixotropes' Verhalten auf, d.h. im ruhendem Zustand ist der Frischbeton steif und bei Zufuhr von (kinetischer) Energie wird dieser flüssig. Gespräch mit Herrn Krauß, MPA Bau/TU München, 08.07.2003
- 35 Allerdings stellt der errechnete und in der Rezeptur-Tabellen aufgeführte W/Z-Wert einen theoretischen Gesamt-Wert dar, da das gesamte zugegebene Wasser zunächst für die Mischung nicht zur Verfügung steht (vgl. 40 % für die Hydratation). Von den 40 % Wasser im Frischbeton (0,40) sind etwa 28 % chemisch und 12 % physikalisch gebunden. Gespräch mit Herrn Krauß, MPA Bau/TU München, 08.07.2003
- 36 Vgl. Technisches Merkblatt der Fa. Sika Addiment, Leimen: Ausgabe 01.03, Sortennummer 10503
- 37 Fa. Wörmann, Darmstadt; Fa. Sika Addiment, Leimen
- 38 Vgl. Technisches Merkblatt der Fa. Sika Addiment, Leimen: Ausgabe 01.03, Sortennummer 10503
- 39 16. Juli 2003
- 40 Wird normalerweise für kleinere Zuschläge (0 bis 4 mm, d.h. Mörtel) eingesetzt. Daher sind die Werte untereinander nur näherungsweise zu vergleichen.
- 41 Der Behälter wird in zwei Lagen eingefüllt und jeweils mit 10 Hüben á 3 cm 'verdichtet'. Dieses Vorgehen wird ebenfalls bei der Befüllung der Prismen für die Schwindmessungen vorgenommen.
- 42 Wie bei den Prüfwürfeln wird der Behälter in zwei Lagen eingefüllt und jeweils 15 Sekunden (bzw. beim zweiten Mal bis keine Luftporen mehr aufsteigen) auf der Rüttelplatte verdichtet.
- 43 Vgl. Kapitel 6.5.3
- 44 Fa. Dr.-Ing. Mahler+Partner GmbH, Fintentrop. Vgl. Prüfzeugnis der MPA NRW - Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, Nr. 42 0609 0 96, v. 20.08.1996
- 45 Vgl. Pfeiffer, 11/2002, S. 37-39
- 46 Vgl. Seidel, 8/2003, S. 26-29
- 47 Tagung "Holz im Hochhausbau". ETH Zürich, Hauptgebäude, Auditorium Maximum, 20.11.2002
- 48 Vgl. Herzog/Sieveke, 11/2002, S. 4-9
- 49 Vgl. Prochiner et al., 4/2001, S. 701-704.
- 50 Vgl. Lindner/Schmitz-Riol, 2001.

## 9 Schlussbemerkungen – Ausblick

Die vorliegenden Forschungsergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchs- und Messreihen haben zum Holzleichtbeton auf unterschiedlichen Ebenen zu neuen Erkenntnissen geführt.

Einerseits werden vorhandene Arbeitsergebnisse, zu den Mischungen und hinsichtlich baukonstruktiver sowie insbesondere bauphysikalischer Eigenschaften validiert und erweitert. Andererseits werden für Holzleichtbeton neue Anwendungen und Kombinationen untersucht, wie die Eignung als Massivabsorber sowie der Verbund mit organischen Latentwärmespeichermaterialien.

Zu dieser Materialkombination sind zum Teil erstmalig sowohl materialspezifische als auch experimentelle Arbeiten durchgeführt und Funktionsmodelle in unterschiedlichen Maßstäben hergestellt worden. Über diese Forschung an Grundlagen hinaus, liegen für alle wesentlichen Schritte Ergebnisse aus vorbereitenden Untersuchungen und mittels Simulationsprogrammen durchgeführte Potenzialabschätzungen zum thermischen Verhalten vor.

Vor dem Hintergrund, dass die Arbeit an der Fakultät für Architektur von einem Architekten durchgeführt wurde, steht immer auch der bauliche Anwendungsbereich, das heißt die Gebäudefassaden und/oder die Innenräume mit ihren wichtigen Ausdrucksqualitäten, im Blickfeld und wird die Materialkombination auch hinsichtlich ihrer gestalterischen Optionen untersucht und bewertet.

Das Ziel der bisherigen Arbeiten ist es, Einsichten in das enorme Potenzial der Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise zu gewinnen, sowie Untersuchungen zur Klärung von Grunddetails für die Anwendung im allgemeinen Hochbau durchzuführen.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass Verbundwerkstoffe aus Holz und anorganischen Bindemitteln eine Reihe interessanter Optionen für den Einsatz im Hochbau, vor allem im Bereich des Ressourcen schonenden Bauens aufweisen.

Holzleichtbeton kennzeichnet im Vergleich zu Normalbeton ein höherer Bindemittelseinsatz. Das Material lässt sich sehr gut verarbeiten, sowohl per Hand als auch mit gängigen Mischgeräten. Gegenüber herkömmlichen Holz- und Holzverbundwerkstoffen unterscheidet sich Holzleichtbeton durch wesentlich höhere Rohdichten, Spröbruchverhalten und geringe hygri-sche Längenänderung. Das Kompositmaterial zeichnet eine Reihe vorteilhafter Bearbeitungseigenschaften aus, es lässt sich sägen, nageln, schrauben. Auch bei der Oberflächenbehandlung bestehen vielfältige Optionen.

Als hygroskopisch dampfdurchlässiger Baustoff ist das thermische Verhalten positiv zu bewerten, sowohl hinsichtlich der Wärmespeicherfähigkeit als auch der Wärmedämmung. Der Holzleichtbeton weist gute Anpassungsmöglichkeiten in den Mischungen auf und kann sowohl einen wirksamen sommerlichen Überhitzungsschutz als auch winterlichen Wärmeschutz leisten.

Demgegenüber lassen die experimentellen Arbeiten zu Holzleichtbeton als Massivabsorber nur ein begrenztes Potenzial erkennen. Trotz einer relativ hohen Volumen bezogenen Wärmespeicherfähigkeit des schweren Holzleichtbeton ( $1250 \text{ kg/m}^3$ ) wird dies beim thermischen Verhalten unter den abgebildeten Randbedingungen nicht wirksam. Es liegt dennoch gutes Datenmaterial zu weiteren Untersuchungen von Einsatzmöglichkeiten als Material für thermisch aktive Bauteile im Bereich der Bauteiltemperierung vor.

Schluss-  
bemerkungen  
Ausblick

Für die Kombination von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien ist nach umfangreichen Versuchen eine gute Beurteilung möglich, gleichermaßen zum mechanischen und zum thermischen Verhalten. Bei höheren Rohdichten (von etwa 1000 bis 1450 kg/m<sup>3</sup>) gegenüber 'normalem' Holzleichtbeton liegt die Druckfestigkeit zwischen 5 und 20 N/mm<sup>2</sup>. Für den betrachteten Anwendungsfall im Bereich von Gebäudefassaden und Innenräumen werden insgesamt gute baukonstruktive Kenngrößen erreicht.

Die W/Z-Werte besonders der leichten Mischungen liegen bei den durchgeführten Versuchen mehr als Faktor 2 über den als 'ideal' bezeichneten 0,55 bis 0,65. Die Ergebnisse zeigen indes, dass bei Holzleichtbeton eine Anlehnung an den 'klassischen' Betonbau diesbezüglich wenig sinnvoll ist. Auch bei hohen W/Z-Werten gewährleistet das Material aufgrund seiner elastomechanischen Eigenschaften eine sehr gute Dauerhaftigkeit. Da sehr hohe Festigkeiten keine Anforderung sind, stellt somit der W/Z-Wert bei der Beurteilung von Holzleichtbeton nicht den gewichtigen herstellungstechnischen und baukonstruktiven Parameter dar. Dieser ist beim Schwindverhalten indes ein wichtiger Indikator, da hohe W/Z-Werte auch zu größerem Schwinden führen. Bei den untersuchten Holzleichtbetonmischungen fällt das Schwindmaß mit Werten zwischen 3,7 und 5,2 mm/m etwas hoch aus. Aber auch hier bewegt sich das Material letztlich in 'normalen' Toleranzbereichen. Ferner bestehen verschiedene Formen einer Vorbehandlung des Restholzes, die eine Minimierung des Schwindverhaltens ermöglichen können. Einschränkungen bestehen zur Zeit hinsichtlich des Brandschutzes, da für den Holzleichtbeton in der Kombination mit Latentwärmespeichermaterialien, in dieser Form und mit

diesen PCM-Materialien, Baustoffklasse A 2 nicht erreichbar ist.

In der thermischen Beurteilung zeigen sich ebenfalls positive Materialeigenschaften. Die Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ -Werte zwischen 0,28 und 0,50 W/mK) liegt bei höheren Rohdichten unter dem Bereich der Holzleichtbeton-Ausgangsmaterials. Weitere Vorteile bestehen im Bereich der Wärmespeicherfähigkeit und des Feuchteausgleichsverhaltens. Gerade hinsichtlich der Kombination mit PCM ist bei diesen Anforderungen noch reichlich Optimierungspotenzial zu erwarten.

Eine durchgeführte Potentialabschätzung zeigt, dass mit Holzleichtbeton eine deutliche Reduktion von Überhitzungsstunden in einem Büroraum – bei effizienten passiven Lüftungs- und Kühlungsstrategien – möglich ist. Mit weiterer Erhöhung der thermischen Speicherfähigkeit durch Verwendung von PCM-Material kann der sommerliche Überhitzungsschutz noch verbessert werden. Damit liegen die Ergebnisse in der Tendenz im Bereich anderer Untersuchungen mit PCM-haltigen Baustoffen.

Darüber hinaus eröffnet die Kombination von Holzleichtbeton mit PCM-Materialien auch eine Reihe interessanter gestalterischer Optionen gleichermaßen für Wand- und Deckenoberflächen sowie für Bodenbeläge. Die thermisch hochleistungsfähigen Stoffe können sichtbar, und damit ablesbar, in gestalterisch hochwertigen Oberflächen gezeigt werden. Diese Vielfalt, die in diesem Verbundmaterial liegt, zeigen exemplarisch Farbmusterreihen sowie Funktionsmodellen mit strukturierten, plastischen Oberflächen.

Gleichwohl besteht trotz einer Vielzahl erarbeiteter Kenngrößen und vorhandener Erfahrungen, noch Optimierungsbedarf; insbesondere hinsichtlich der Mischungsverhältnisse,

Verarbeitungsverfahren und zum Einsatz textiler Bewehrungsarten.

Um vorgefertigte, großformatige Bauteile aus Holzleichtbeton für den Hochbau einsetzen zu können, sind ebenfalls noch detaillierte Forschungsarbeiten zum baukonstruktiven Verhalten sowie zu herstellungstechnischen Aspekten erforderlich, zum Beispiel hinsichtlich:

- der verwendeten Form des Holzzuschlages, ob als Partikel, Granulat, Faser, Span bzw. Kombinationen
- des Verhaltens bei anderen Zementarten, vor allem zur Verbesserung der Eigenschaften in der Frischbetonphase
- des Einflusses von Zusatzmitteln auf die Verarbeitbarkeit
- des Einsatzes von Verbindungsmitteln und der Aufstellung vereinfachter Berechnungsverfahren

Weitere wichtige Untersuchungen betreffen die Bewertung des Holzleichtbetons unter Aspekten der Nachhaltigkeit, Einsparungspotenziale von mineralischen Rohstoffen sowie dessen Recyclingfähigkeit.

Aufgrund der positiven Eigenschaften lässt sich Holzleichtbeton als zukunftsweisendes und leistungsfähiges Material bezeichnen. Holzleichtbeton kann als Baumaterial mit am Markt üblichen Baustoffen konkurrieren und Bauteile aus diesem Material eignen sich für vielfältige Einsatzmöglichkeiten im Baubereich. Die Holzleichtbeton-Massivholz-Verbundbauweise ist sowohl für den Einsatz im Mehrgeschossbau als auch im Fertigteilbau oder Innenausbau gut geeignet.

- Abhandlung über das Thema: Steinholz, seine Herstellung, Verwendung und Vorzüge gegenüber anderen Fussbodenbelägen [...]. Leipzig 1923
- Ahnert, Rudolf; Krause, Karl Heinz: Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Bd. 2. Berlin, München 3/1996
- Auberg, Rainer: Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. <http://www.wissbau.de/Sammlung/VDI2.htm> <15.08.2003>
- Aurich, Heinz: Kleine Leichtbetonkunde. Wiesbaden, Berlin 1971
- Baumgartner, Herwig: Perfider Schalldämpfer. Schalldämmung und Trittschallschutz von Brettstapeldecken und -wänden. In: db - Deutsche Bauzeitung, 132. Jg., 10/1998, S. 138-150
- Bayer, Edwin; Klose, Norbert: Beton – Prüfung nach Norm. Hrsg. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie. Düsseldorf 10/1996
- Beck, Andreas (Hg.): Innovative Systeme und Optimierte Techniken zur Energetischen Gebäudesanierung. ISOTEG – Abschlussbericht. Würzburg 2001
- Belz, Walter; Gösele, Karl; Jenisch, Richard; Pohl, Reiner; Reichert, Hubert: Mauerwerk Atlas. München 6/1996
- Beraus, Erich: Holzspanbeton. Naturbaustoff - ökologisch und wirtschaftlich. In: Beton + Fertigteil Jahrbuch 2001. Wiesbaden u.a. 2001, S. 103-109
- Betone mit besonderen Eigenschaften. Zement-Merkblatt Betontechnik. Bauberatung Zement. Nr. B 9, 06.00/20
- Betonfasertechnik mit alkaliresistenten Glasfasern. Sonderdrucke aus: BWI - BetonWerk International. Zürich 2001
- Blaß, Hans Joachim; Schlager, Marina: Trag- und Verformungsverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. Teil 1. In: Bauen mit Holz, 98. Jg., 5/1996, S. 392-399
- Bobran, Hans W.: Handbuch der Bauphysik. Berechnungs- und Konstruktionsgrundlagen für Schallschutz, Raumakustik, Wärmeschutz, Feuchtigkeitsschutz. Braunschweig 3/1976.
- Bock, Thomas; Prochiner, Frank O.: Automatisierungssysteme des Wohnungsbaus in Japan und Deutschland. Stuttgart 1999
- Brandt, Jörg; Moritz, Helmut: Bauphysik nach Maß. Planungshilfen für Hochbauten aus Beton. Düsseldorf, 1995.
- Braun, Hans-Jürgen; Schaal, Werner; Schneck, Friedrich: Der Brettstapel als Verbundelement - Vorschlag fuer einen Berechnungsansatz. In: Bautechnik, 75. Jg., 8/1998, S. 539 - 547.
- Braun, Otto: Was ist Steinholz? In: Abhandlung über das Thema: Steinholz [...]. Leipzig 1923, S. 3-4
- Brettstapel-Bauweise. In: Bauen mit Holz, 99. Jg., 5/1997, S. 324 - 325
- Bundesarchitektenkammer (Hg.): Energiegerechtes Bauen und Modernisieren. Basel u.a. 1996
- Bursian, Gerolf; Pinternagel, Ernst-Karl: Holzbeton. Produktion, Anwendung und Erfahrungen. Schriftenreihen der Bauforschung; Bd. 20. Berlin(Ost) 1973
- Cammerer, Walter F.: Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen und in der Industrie. Berlin; Heidelberg; New York u.a. 5/1995.
- Cerliani, Christian; Baggenstos, Thomas: Holzplattenbau. Dietikon 2000
- Charisius, Kurt: Über das Wesen, die Herstellung und Eigenschaften von Holzbeton. Berlin 1947
- Chevalier, Roger: Das unterschätzte Innovationspotenzial. Innovation erfolgreich betreiben - auch im Bauwesen. In: Fassade Façade, 3/2002, S. 31-36
- Conrads, Ulrich: Bauprodukte, die der Architekt sich wünscht. In: Deutsches Architektenblatt, 17. Jg., 3/1985, S. 295-296

- Cordes, Friedrich: Über Prüfverfahren und Normen für fugenlose Steinholz- und Dermas-Beläge [...]. Dissertation. Peine 1932
- DELTA-PCM. Wärmespeicherplatten. Intelligentes Temperaturmanagement ohne Klimaanlage. Produkt-Informationen. Herdecke (12)/2003
- Delzer, Siegfried: Abschlussbericht über die Testreihe des Feuchteausgleichs der Holz-Leicht-Beton-Platten (HBL). Lörrach 06/2003
- Ebeling, Karsten; Knopp, Wolfgang; Pickhardt, Roland: Beton – Herstellung nach Norm. Düsseldorf 14/2002
- Emperger, v.: Holz als Ersatz des Eisens in der Zugbewehrung. In: Beton und Eisen, 18. Jg., Heft I/1919, S. 7-8
- Emperger, v.: Holz und Schilf als Ersatz des Eisens in der Zugbewehrung. In: Beton und Eisen, 18. Jg., Heft IV-V/1919, S. 46-48
- Fassaden aus Stein. Hrsg. Dyckerhoff Weiss Marketing und Vertriebs-Gesellschaft. Wiesbaden, 2004
- Fasse, Richard: Das Steinholz. Über das Steinholzmaterial und seine praktische Anwendung. Leipzig 1921
- Fasse, Richard: Der schlesische Magnesit. Ein Leitfaden für die praktische Verwendung der schlesischen Magnesite in der Steinholz-Industrie. Leipzig 1923
- Fasse, Richard: Bauuntergrund für Steinholz. Normen für die Herstellung von zweckmäßigen Steinholzunterlagen zur Vermeidung von Schäden. Hannover 1924
- Fieback, Klaus; Gutberlet, Helmut: Paraffine in der Wärmetechnik. Ein universelles Latentwärmespeichermaterial. In: Wärmetechnik, 7/1997, S. 1-8. Sonderdruck.
- Fiebiger, N.: Von den Grundlagen zum marktfähigen Produkt. Vortrag anlässlich der 8. Mitgliederversammlung des ZAE Bayern. Vortragsmanuskript. Nürnberg 17. Juli. 1998
- Gliniorz, Kai-Uwe: Holz als Zuschlagsstoff. In: Architektur & Technik, 24. Jg., 1/2001, S. 36-39
- Gliniorz, Kai-Uwe: Holzleichtbeton auf dem Weg zum Markt. Von der Grundlagenforschung an der ETH in die Praxis. Publication IBOIS 00:20. Lausanne 2000, S. 2-3
- Gliniorz, Kai-Uwe: Textilbewehrter Holzleichtbeton. Forschung und Anwendungen. In: 6. Internationales Symposium für die Holzwirtschaft. Materialkombination und Verbundwerkstoffe. 16./17. Juni 2000, SH-Holz. Biel 2000, o.S.
- Gliniorz, Kai-Uwe; Natterer, Julius: Formbauteile aus Holzleichtbeton. Abschlussbericht KTI-Projekt 3497.1. Lausanne 2000
- Gliniorz, Kai-Uwe; Natterer, Julius: Mineralisiertes Holz im statischen Einsatz. Holzleichtbeton. In: mikado. Unternehmensmagazin für Holzbau und Ausbau, 2/2002, S. 64-66
- Graf, Otto: Über die Herstellung und über die Eigenschaften des Betons aus Zement und Holzspänen. Wiesbaden 1949.
- Grün, Richard: Das Steinholz. In: Abhandlung über das Thema: Steinholz [...]. Leipzig 1923, S. 29-31.
- Hacker, Zdenek: Vermessung der thermischen Leistungsfähigkeit von Bauteilen in Massivholz-Leichtbeton-Verbundbauweise. (Interner) Bericht ZAE Bayern. München/Garching 02/2002
- Hammer, Renate; Jung, Patrick: Beton in der Solararchitektur. Wien Oktober 2000
- Handbuch Sonnenheiztechnik. Massiv-Absorber Heizsysteme, Wärmepumpenanlagen, Solarwärmenutzung. Waghäusel 1997
- Hanser, Albrecht: Vorfertigung im Holzbau - ein internationaler Vergleich. In: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift, 49. Jg., 9/2001, S. 88-93.
- Härig, Siegfried; Günther, Karl; Klausen, Dietmar: Technologie der Baustoffe. Handbuch für Studium und Praxis. Heidelberg 12/1994.
- Hauser, Gerd; Stiegel, Horst: Wärmebrückenatlas für den Holzbau. Wiesbaden, Berlin 1992.
- Hauser, Gerd; Stiegel, Horst: Wärmebrückenatlas für den Mauerwerksbau. Wiesbaden, Berlin 3/1996.
- Hebgen, Helmut: Bauen mit der Sonne. Vorschläge und Anregungen. Essen (u.a.) 1982
- Hegger, Josef; Kommer, Boris: Neue Entwicklungen im Fertigteilbau. In: Führer, Wilfried; Hegger, Josef (Hg.): Vom Baukasten zum intelligenten System. Symposium RWTH Aachen 10.-11.10.2000. Aachen 2000, S. 45f.
- Hegger, Josef; Molter, Matthias: Textilbewehrter Beton - Ein neuer Verbundwerkstoff. In: Deutsches Architektenblatt, 1/2001, S. 40-42.
- Hegger, Josef; Will, Norbert: Bauteile aus textilbewehrtem Beton. In: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift, 51. Jg., 4/2003, S. 68-71
- Heimberger, Walter: Steinholz. Ein Beitrag zur Lösung des Fußboden-Problems. Wiesbaden: Bauverlag, 1955
- Heller, Dieter: Leichtbeton - die neue Energieeinsparverordnung. In: Beton + Fertigteil Jahrbuch 2002. Wiesbaden u.a. 2002, S. 87-95
- Hellwig, Runa; Hausladen, Gerhard: Sommerliches Wärmeverhalten. Einfache Bewertung. In: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift, 6/2003, S. 72-74
- Henning, Hans-Martin; Schossig, Peter: Thermisch schwere Leichtbaustoffe. Projekt-Informationen. Freiburg März/2003.
- Herzog, Thomas (Hg.): Die Halle 26 für die Deutsche Messe AG Hannover. München u.a. 1996
- Herzog, Thomas: Nachhaltiges Bauen. Vortrag im Rahmen der Reihe "Technik und Ethik. Architektur, Bau und Lebensgestaltung" an der TU München 22.05.2000
- Herzog, Thomas; Sieveke, Matthias: Im Dreitakt himmelwärts. In: Beilage zur Hochparterre 11/ 2002, S. 4-9
- Hoeft, Markus: Jenseits von Blockhaus-Charme. In: bba, 11/2002, S. 46-50
- Holzbeton im Landwirtschaftsbau. Konstruktive Lösungen mit bauaufsichtlicher Zustimmung für nichttragende vorgesetzte Wände an Stahlbeton-Skelettkonstruktionen. Potsdam 1971
- Hullmann, Heinz: Materialeexperimente. Innovationen bei Konstruktion und Gestaltung. In: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift, 12/2002, S. 26-29
- Hummel, Alfred: Das Beton-ABC. Schwerbeton, Leichtbeton. Ein Lehrbuch für die zielsichere



- Herstellung und die wirksame Überwachung von Beton. Berlin 7-9/1944
- Hummel, Alfred: Das Beton-ABC. Schwerbeton, Leichtbeton. Ein Lehrbuch für die zielsichere Herstellung und eine wirksame Baustellenüberwachung. Berlin 10/1948
- Hummel, Alfred: Das Beton-ABC. Ein Lehrbuch der Technologie des Schwerbetons und des Leichtbetons. Berlin 12/1959
- Informationen zur Eigenheimbau; Bd. 13. Einzelhaus HB2 "Crottendorf". Berlin(Ost) 1973
- Informationen zur Eigenheimbau; Bd. 7. Holzbeton-Einzelhäuser HB3 HB4. Berlin(Ost) 1972
- Jastrow, Roy: Optimierung eines Wärmepumpen-Heizsystems mit Betonabsorbern. Düsseldorf 1997.
- Jung, Pirmin: Alte Verbindung neu entdeckt. Verdübelter Brettstapel im neuzeitlichen Holzbau. In: Bauen mit Holz, 100. Jg., 5/1998, S. 18-19
- Kind-Barkauskas, Friedbert; Kauhsen, Bruno; Polónyi, Stefan; Brandt, Jörg: Beton Atlas. Entwerfen mit Stahlbeton im Hochbau. München u.a. 1995.
- Kling, Bernhard; Peck, Martin: Sichtbeton im Kontext der neuen Betonnormen. Verantwortlichkeiten und besondere Anforderungen. In: Beton. 53. Jg., 4/2003, S. 170-176
- Kolczyk, Holger; Rings, Karl-Heinz: Selbstverdichtender Beton SVB/SCC ein neuer Hochleistungsbeton. [http://www.addiment.de/akt\\_beton\\_svb2a.html](http://www.addiment.de/akt_beton_svb2a.html) <09.07.2003>
- Kolb, Josef: Bausysteme im Holzbau. In: Bauhandwerk, 17. Jg., 5/1995, S. 41-46
- Kolb, Josef: Systembau mit Holz. Tragkonstruktion und Schichtaufbau der Bauteile. Zürich-Dietikon 2/1992
- König, Gert; Faust, Thorsten: Konstruktiver Leichtbeton im Verbundbau. In: Stahlbau, 69. Jg., 7/2000, S. 528-533
- Koschenz, Markus: Tabs mit Phasenwechselmaterial. In: Technik am Bau, 1/2003, S. 60-65.
- Koschenz, Markus; Lehmann, Beat: Thermoaktive Bauteilsysteme tabs. Dübendorf 2000
- Kress, Fritz: Der Zimmerpolier. Ein Fachbuch für Zimmerleute, Techniker, Architekten aus allen Gebieten des Holzbaues. Buch der Zimmerleute; Bd. 2. Ravensburg 7/1942
- Krippner, Roland: Entwicklung beweglicher Manipulatoren im Bereich der Außenwände [...]. In: Beck, Andreas (Hg.): Innovative Systeme und Optimierte Techniken zur Energetischen Gebäudesanierung. Würzburg 2001
- Krippner, Roland: Neue Holzverbundwerkstoffe für das Bauwesen - Zum Stand der Entwicklung und Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton. Vortrag ETH Tagung "Holz im Hochhausbau". Zürich 20.11.2002
- Kruse, Martin; Friedrich, Uwe: Latentwärmespeicher in Bausystemen. BINE projektinfo 06/02. Eggenstein-Leopoldshafen 2002
- Kuhlmann, Ulrike; Gerold, Matthias; Schänzlin, Jörg: Brettstapel-Beton-Verbund - Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden. In: Bauingenieur, 75. Jg., 6/2000, S. 281-288
- Lainsecq, Margrit de: Speicherndes Leichtgewicht. In: Architektur & Technik, 24. Jg., 1/2001, S. 40
- Lenzen, Birgit: Entwicklung und Untersuchung eines latentwärmespeichernden Baumaterials zum Einsatz in transparent gedämmten Außenwänden. Dissertation. Berlin 2001
- Lindner, Gerhard; Schmitz-Riol, Erik: Systembauweise im Wohnungsbau. Kostengünstiger, qualitätsvoller und ökologischer Wohnungsbau. Düsseldorf 2001.
- Löfflad, Hans: Brettstapelbauweise. Technologische, ökologische und ökonomische Aspekte. Aachen 1998.
- Ludwig, Horst-Michael; Hemrich, Wolfgang; Weise, Frank; Ehrlich, Norbert: Der neue Beton. Selbstverdichtender Beton - Grundlagen und Praxis. In: Beton + Fertigteil Jahrbuch 2002. Wiesbaden u.a. 2002, S. 113-131
- Mehling, H.; Hiebler, S.; Cabeza, L. F.: News on the Application of PCM for Heating and Cooling of Buildings. In: 3rd Workshop IEA, ECES IA Annex 17 Tokyo/Japan, 01-02 October 2002
- Mehling, Harald: Latentwärmespeicher. BINE Informationsdienst; themeninfo IV/02. Eggenstein-Leopoldshafen 2002
- Mehling, Harald: Latentwärmespeicherung: "Neue Materialien und Materialkonzepte". In: Bonhoff, Klaus et al. (Hg.): FVS Forschungsverbund Sonnenenergie Workshop 2001. Berlin März 2002, S. 85-100
- Merkblatt Sichtbeton. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, Bundesverband der Deutschen Zementindustrie (Hrsg.). Düsseldorf März 1997
- Meyers Großes Taschenlexikon in 24 Bänden. Mannheim; Wien, Zürich 2/1987
- Müller, Harald S.: Leichtbeton - Materialeigenschaften und neue Entwicklungen. In: Spectrum. Sonderausgabe. 43. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tage, 1/1999, S. 184-193
- Natterer, Julius: Bauphysikalische Kennwerte und Betrachtungen zum Holzbeton. (Textmanuskript). Saulburg/Wiesenfelden 2000e
- Natterer, Julius: Brettstapelbauweise. In: Wohnung + Gesundheit, 19. Jg., Nr. 83, 6/1997, S. 9 - 10
- Natterer, Julius: Entwicklung von wärmeaktiven Verbundelementen. (Textmanuskript.) Saulburg/Wiesenfelden 02/1999.
- Natterer, Julius: Stand der Entwicklung von textilbewehrten Holzleichtbeton für thermoaktive Bauteile. (Textmanuskript.) Saulburg/Wiesenfelden 2000
- Natterer, Julius: Stapelbauweise und Holz-Beton-Verbundbauweise. In: Detail, 37. Jg., 1/1997, S. 10-11.
- Natterer, Julius; Gliniorz, Kai-Uwe: Holzleichtbeton der ETH Lausanne. Ökologie und Ökonomie sinnvoll verbinden. Publication IBOIS 00:24. Lausanne 2000, S. 2-6
- Natterer, Julius; Gliniorz, Kai-Uwe: Vom Steinholz zum Holzleichtbeton. Publication IBOIS 00:21. Lausanne 2000, S. 2-4
- Natterer, Julius; Herzog, Thomas; Volz, Michael: Holzbau Atlas Zwei. München 2/1996.
- Neunast, Armin; Lange, Friederike: Leichtbeton-Handbuch. Düsseldorf 2001

- Anhang
- Literaturverzeichnis
- Niesing, Birgit: Wärme speichern mit Wachs. In: Arconis. Wissen zum Planen und Bauen, 8. Jg., 4/2003, S. 48-49
- Niewienda, Andreas: Konzepte zur solar gestützten Energieversorgung von Gebäuden. In: Schölkopf, Wolfgang (Hg.): Endbericht SOLEG. Würzburg 2002, S. 3.11-1 - 3.11-21
- Oberdorf, Christian: Massivholz-Leichtbeton-Verbundbauweise. Holzleichtbeton als passives Bauteil. (Interner) Bericht ZAE Bayern Abt. 4. München/Garching 08/2001
- Oberdorf, Christian: Thermisch aktive Bauteile in Massivholz-Leichtbeton-Verbundbauweise – Potenzialabschätzung. (Interner) Bericht ZAE Bayern. München/Garching 2002
- Pfafferott, Jens: Passive Kühlung mit Nachtlüftung. BINE Informationsdienst; themeninfo 1/03. Eggenstein-Leopoldshafen 2003
- Pfäffinger, Jörg: Dünne Dämmsysteme verschlanken den Holzbau. In: mikado, 12/2002, S. 22-25
- Pfeifer, Günter: Das kybernetische Prinzip. In: Der Architekt, 11/2002, S. 37-44
- Pfeifer, Günter: Energieeffizientes Bauen. In: Der Architekt, 2/2001, S. 19
- Pizzigoni, Attilio; Zambelli, Sergio; Behrens, Ralf: Von der Kunst zur Technologie. Ein Gespräch mit [...]. In: Dworschak, Gunda; Wenke, Alfred: Der neue Systembau. Düsseldorf 1999, S. 87
- Preiss, W.: Stützen stark wie Herkules. In: VDI Nachrichten, Nr. 47, 22.11.2002, S. 20
- Primus, Illo-Frank (Hg.): Massivabsorber. Die Wärmequelle für die Wärmepumpe. Düsseldorf 1995
- Probst, Erich: Handbuch der Zementwaren- und Kunststeinindustrie. Halle a.S. 3/1927
- Probst, Erich: Steinholz. Fußböden und Platten aus Magnesitbinder. Wiesbaden 1951
- Prochiner, Frank O.; Walczyk, Ralf; Hartmann, Domenikus: Innovative Schnellverbinder - die Schlüsseltechnologie zum Fertighausbau. In: Detail, 41. Jg., 4/2001, S. 701-704
- Puch, Volker: Wärmeflasche für Häuser. In: Süddeutsche Zeitung, Nr. 78, 03.04.2001, S. V2/7
- Pültz, Gunter: Bauklimatischer Entwurf für moderne Glasarchitektur. Passive Maßnahmen der Energieeinsparung. Reihe: Angewandte Bauphysik. Berlin 2002
- Radwan, C.: Leiser Beton macht Karriere. Selbstverdichtender Beton beweist hohe Qualität. In: VDI Nachrichten, Nr. 36, 07.09.2001, S. 20
- Reichel, Alexander: Vielfalt mit System - Fassaden aus Glasfaserbeton. In: Detail, 41. Jg., 4/2001, S. 696-700
- Roider, Michael: Forschungsvorhaben Holzleichtbeton. (Interner) Bericht IEZ Natterer GmbH. Saulburg/Wiesenfelden 19.02.2001a
- Roider, Michael: Betonierung der beiden HLB-Elemente. (Interner) Bericht IEZ Natterer GmbH. Saulburg/Wiesenfelden 19.02.2001b
- Rostásy, Ferdinand S.: Baustoffe. Stuttgart u.a. 1983
- Sambeth, Burkhard M.: Holz- und Holzwerkstoffe. In: Haefele, Gottfried; Oed, Wolfgang; Sambeth, Burkhard M. (Hg.): Baustoffe und Ökologie. Tübingen u.a. 1996, S. 158-183
- Schaal, Werner; Braun, Hans-Jürgen; Gerold, M.: Brettstapel als Konstruktionselement. Eine Alternative für Decken und Wände, die handwerklich und industriell hergestellt werden können. Teil 1. In: Bauen mit Holz, 99. Jg., 1/1997, S. 20 - 29; Teil 2, 2/1997, S. 89-96
- Scherer, Robert: Die künstlichen Fußböden- und Wändebeläge. Wien u.a. 1907
- Schild, Kai; Weyers, Michael: Handbuch Fassadendämmsysteme. Grundlagen - Produkte - Details. Stuttgart 2003
- Schmidt, Marco; Jahns, Ekkehard: Latentwärmespeicher PCM – Modifikation für Baustoffe. In: SOBIC Seminar, 03.12.2003, o.S.
- Schölkopf, Wolfgang (Hg.): Endbericht SOLEG. Solar gestützte Energieversorgung von Gebäuden. Würzburg 2002
- Schossig, Peter: Baustoffe mit mikroverkapselten Latentmaterialien – Aufbau, Anwendung. In: SOBIC Seminar, 03.12.2003, o.S.
- Schubert, Bärbel: Untersuchungen zum System Holz-Zement-Wasser. Dissertation. Dresden 1991
- Schwarz, Bernhard: Wärme aus Beton. Systeme zur Nutzung der Sonnenenergie. Düsseldorf 1987
- Seidel, Arnim: Aus Stab ward' Platte. Holzbau im Wandel. In: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift, 51. Jg., 8/2003, S. 26-29
- Selbstverdichtender Beton - eine Demonstration. In: Das Bauzentrum/Baukultur, 49./22. Jg., 6/2001, S. 28
- Setzer, Max J.: DFG - Sonderforschungsbereich - SFB 398. "Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte unter Schädigungs- und Deteriorationsaspekten". <http://www.uni-essen.de/lbpmw/DE/sfb398.htm> <15.08.2003>
- Sieveke, Matthias: Möglichkeiten der konstruktiven Ausbildung und der baulichen Integration von nachträglich eingebauten thermischen Flüssigkeitsspeichern [...]. Dissertation. München 2000
- SOBIC Seminar "Leichte Baustoffe – thermisch schwer". Freiburg, Fraunhofer - Solar Building Innovation Center SOBIC / Fraunhofer ISE, 03.12.2003
- Tätigkeitsbericht 1999. Hrsg. Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern). Würzburg 2000
- Tätigkeitsbericht 2001. Hrsg. Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern). Würzburg 2002
- Technische Berichte - Ausgabe 1956. Bonn: Fachverein Steinholz e.V., 1956
- Vollenschaar, D. (Hg.): Wendehorst Baustoffkunde. Hannover 25/1998
- Watts, Andrew: Moderne Baukonstruktion. Neue Gebäude, neue Techniken. Reihe moderne Baukonstruktion. Wien; New York 2001
- Werner, Gerhard: Holzbau. Teil 1 Grundlagen. Werner-Ingenieur-Texte 48. Düsseldorf 1977
- Werner, Hartmut: Brettstapelbauweise. Holzbau Handbuch, Reihe 1, Teil 17, Folge 1. Arbeitsgemeinschaft Holz e.V. Düsseldorf 1998

- Wetzell, Otto W. (Hg.): Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln. Stuttgart u.a. 28/1998
- Winkelmüller, Stefan: Thermische Gebäudesimulationen zur Potenzialabschätzung des Verbunds von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien. (Interner) Bericht ZAE Bayern Abt. 4. Garching 26.11.2003
- Winter, Wolfgang; Dreyer, Jürgen; Schöberl, Helmut: Holzbauweisen für den verdichteten Wohnbau. Wien September 2001
- Wolf, T.; Tichelmann, Karsten; Pfau, Jochen: Brettstapelbauweise. Konstruktionsübersichten, Bemessung, Bauphysik, Details. Neu-Isenburg 1998
- ZAE Bayern: Thermische Charakterisierung von Holzbeton-Proben. Report ZAE 2 - 1000 - 3. Würzburg 2000
- ZAE Bayern; Manara, Jochen; Beck, Andreas: Messungen mit dem Sonnensimulator. Ergänzung zu: Report ZAE 2 - 1002 - 1 (2002). Würzburg 2/2003
- ZAE Bayern; Manara, Jochen; Beck, Andreas: Thermische Charakterisierung von Holzbetonproben mit Latentwärmespeichermaterialien. Report ZAE 2 - 1002 - 1 (2002). Würzburg 10/2002
- Zürcher, Christoph; Frank, Thomas: Bauphysik. Leitfaden für Planung und Praxis. Bau und Energie; Bd. 2. Zürich, Stuttgart 1998
- Zwinger, Markus; Gahr, Peter: Mögliche Anwendungen von Latentwärmespeichern in Bausystemen. In: Baumeister, 99. Jg., 3/2002, S. 29-31

## 10.2 Eigene Veröffentlichungen im Rahmen der Dissertation

- Krippner, Roland: Entwicklung von thermisch aktiven Bauteilen in Massivholz-Leichtbeton-Verbundbauweise. In: Tätigkeitsbericht 1999. Würzburg 2000, S. 28
- Krippner, Roland: Holzleichtbeton im Fassadenbereich. Manuskript anlässlich des "Pressegesprächs" zur "Swissbau 02/Metallbau 02". Basel 31.10.2001.
- Krippner, Roland; Herzog, Thomas: Wood-lightweight-concrete in the building skin. V5.55. Posterpräsentation. 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Amsterdam RAI International Exhibition and Congress Centre The Netherlands, 17.-21. June 2002,
- Krippner, Roland: Wood-lightweight-concrete in the building skin. Posterpräsentation. UIA Berlin 2002, XXI. World Congress of Architecture. Berlin, 22.-26. July 2002,
- Krippner, Roland: Untersuchung von Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien im Bereich von Gebäudefassaden. In: Tätigkeitsbericht 2001. Würzburg 2002, S. 29
- Krippner, Roland: Holzleichtbeton. In: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift, 50. Jg., 12/2002, S. 74-77
- Krippner, Roland: Untersuchungen zur Optimierung des Verbunds von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien. In: Tätigkeitsbericht 2002. Würzburg 2003, S. 58

## 10.3 Abbildungsnachweis

- Betonfasertechnik mit alkaliresistenten Glasfasern, 2001, S. 4  
Abb. 2.5
- Bundesarchitektenkammer (Hg.), 1996, S. 30, 67, 65  
Abb. 7.1, 7.2, 7.105
- Bursian/Pinternagel, 1973, S. 40 ol., 41 ul., 40 ml.  
Abb. 4.8, 4.9, 4.10
- DELTA-PCM, (12)/2003, o.S.  
Abb. 7.5
- DELZER-Kybernetik, Lörrach  
Abb. 7.99, 7.100, 7.101, 7.102, 7.103, 7.104
- Fasse, 1921, S. 46  
Abb. 4.1
- Gliniorz, 1/2001, S. 37 o., 36 o, 38 o  
Abb. 2.6, 5.2, 5.5
- Gliniorz/Natterer, 2000, S. 16, 26, 26  
Abb. 3.2, 5.3, 5.4,
- Hacker, 02/2002, S. 2, 3, 3f., 5, 2, 8, 11  
Abb. 6.18, 6.19, 6.20, 6.21, 6.22, 6.24, 6.25
- Handbuch Sonnenheiztechnik, 1997, S. 7.1-4  
Abb. 6.7
- HeinzeBauOffice, 2000, Datenblatt-Nr. 2093/01  
Abb. 4.17
- Herzog (Hg.), 1996, S. 57  
Abb. 8.3
- Herzog, Thomas; Sieveke, Matthias. München  
Abb. 8.36
- Holzforschung München  
Abb. 7.92
- Hummel, 12/1959, S. 266  
Abb. 4.6
- IEZ Natterer GmbH, Saulburg/Wiesenfelden, 11/2000  
Abb. 5.6
- Informationen zur Eigenheimbau, 1972, Titel  
Abb. 4.13
- Kind-Barkauskas et al., 1995, S. 63, 63, 71  
Abb. 8.4, 8.5, 8.6
- Kruse/Friedrich, 2002, S. 1 m.  
Abb. 2.7

Abbildungsnachweis

Mehling, 2002, S. 2, 2  
Abb. 7.4, 7.6  
MPA BAU, TU München  
Abb. 7.20, 7.27, 7.28, 7.69, 7.70, 7.71, 7.72,  
7.74, 7.75, 7.76  
Oberdorf, 08/2001, S. 2, 2, 3, 3, 4, 5, 5, 7  
Abb. 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19,  
5.20  
Oberdorf, 2002, S. 1, 3, 3, 4, 5  
Abb. 6.26, 6.27, 6.28, 6.29, 6.30  
Odenwald Faserplattenwerk, Amorbach  
Abb. 7.96, 7.97  
Primus (Hg.), 1995, S. 46 o  
Abb. 6.5  
Produktunterlagen "Der ökologische Baustoff" der  
Fa. ISOSPAN Baustoffwerk GmbH, Ra-  
mingstein/A (10/2001)  
Abb. 4.15  
*RUBITHERM*, Produktunterlagen der Fa. *RUBI-  
THERM*, Hamburg/Fürstenwalde  
Abb. 7.3, 7.7, 7.15  
Schwarz, 1987, S. 29, 32  
Abb. 6.3, 6.4  
Technische Berichte, 1956, S. 29, 26 u., 32 u.  
Abb. 4.2, 4.4, 4.5  
Wilhelm Dyckerhoff Institut für Baustofftechnolo-  
gie, Wiesbaden  
Abb. 7.79, 7.80, 7.81, 7.82, 7.85, 7.86, 7.87,  
7.88  
Winkelmüller, 2003, S. 4, 5, 6f., 9, 11, 13  
Abb. 7.107, 7.108, 7.109, 7.110, 7.111, 7.112  
ZAE Bayern, 10/2002, S. 5, 7, 8, 8, 9, 12, 13, 14,  
14, 15  
Abb. 7.52, 7.54, 7.55, 7.56, 7.57, 7.59, 7.61,  
7.62, 7.63, 7.64  
ZAE Bayern, 2/2003, S. 5  
Abb. 7.65  
ZAE Bayern, 2000, Tab. 5, S. 5, 9  
Abb. 5.7, 5.8, 5.10

Die übrigen Abbildungen stammen vom Autor

#### 10.4 Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten

$a_s$	Absorptionszahl	
A	Aperturfläche	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
t	Aufheizdauer	
d	Bauteil-/Schichtdicke	cm/m
BS	Brettstapel	
F	Bruchlast	kN
Q	Differenz-Wärmestrom	W/g
$\beta_w$	Druckfestigkeit Würfel	N/mm <sup>2</sup>
$\beta_{Zyl}$	Druckfestigkeit Zylinder	N/mm <sup>2</sup>
DDK	Dynamischer Differenz Kalorimeter	
$E_\beta$	E-Modul	N/mm <sup>2</sup>
FM	Fliessmittel	
HBW	Hellbezugswert	%
u	Holzfeuchte	%
HLB	Holzleichtbeton	
PCM	Latentwärmespeichermaterial	
LW	Luftwechsel/-rate	h/1
$m_u$	Masse der feuchten Holzprobe	g
$m_o$	Masse der trockenen Holzprobe	g
$\sigma_o$	Prüfspannung, obere	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_u$	Prüfspannung, untere	N/mm <sup>2</sup>
$\rho$	Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>
$H_s$	Schmelzenthalpie	J/g
$E_{glob}$	Solare Bestrahlungsstärke	W/m <sup>2</sup>
$S_w$	Solargewinnfaktor, Wand	
GR	Speichergranulat/PCM	
$T_w$	Temperatur, Auslass-	°C
$T_k$	Temperatur, Einlass-	°C
t	Temperatur, °Celsius	°C
Dt	Temperaturdifferenz	K
TDDK	Temperaturmodulierter Dynami- scher Differenz Kalorimeter	
$t_u$	Umgebungslufttemperatur = Lufttemperatur	°C
V	Volumenstrom	l/h
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/m <sup>2</sup> K
$U_{eff}$	Wärmedurchgangskoeffizient, tatsächliche, effektive	W/m <sup>2</sup> K
$U_w$	Wärmedurchgangskoeffizient, Wand	W/m <sup>2</sup> K
R	Wärmedurchlasswiderstand	m <sup>2</sup> K/W

$c_p$	Wärmekapazität, spezifische	J/gK
S	Wärmekapazität, Volumen bezogene	kWh/m <sup>3</sup> K
Q	Wärmeleistung	W
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
WRG	Wärmerückgewinnung	
$\eta$	Wärmerückzahl	
h	Wärmeübergangskoeffizient, äußerer konvektiver	W/m <sup>2</sup> K
$R_{si}$	Wärmeübergangswiderstand, innerer	m <sup>2</sup> K/W
$R_{se}$	Wärmeübergangswiderstand, äußerer	m <sup>2</sup> K/W
w	Wassergehalt	kg/m <sup>3</sup>
W/Z-	Wasser-Zement-Wert	
$\eta$	Wirkungsgrad	

- Stoffraumberechnung	172	Anhang
<p>Im Zusammenhang der Untersuchungen zur Kombination von Holzleichtbeton mit Latentwärmespeichermaterialien wurden insgesamt fünf verschiedene Testreihen vorgenommen:</p>		
- Betonage 1 (06.09.2001) Rezepturen I a-b bis III c-d Erste Versuche auf Basis der Veränderung des Masse-Anteils von Holz und Paraffin; Messungen der Druckfestigkeit	173	
- Betonage 2 (13./16.05.2002) Rezepturen I bis VIII Optimierung der Rezepturen auf Basis einer Stoffraumberechnung mit in Stufen modifiziertem Parafingehalt; Messungen der Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, des E-Moduls sowie der Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität; Versuch im Kleinbrandofen; Frost-Tauwechsel-Prüfung an ausgewählten Proben	180	
- Betonage 3 (10.01.2003) Rezepturen III und VI Herstellung von Farbmustern; Messung des Schwindverhaltens, Brandschachttest sowie Untersuchungen zum Feuchteausgleichsverhalten (ohne Farbzusätze)	196	
- Betonage 4 (03.07.2003) Ausgangsrezeptur (600 kg/m <sup>3</sup> ) plus Rezepturen III und VI Herstellung von Funktionsmodellen mit strukturierten Oberflächen; weitere Messung des Schwindverhaltens, Messungen der Druckfestigkeit bei der Ausgangsrezeptur	200	
- Betonage 5 (16.07.2003) Ausgangsrezeptur (600 kg/m <sup>3</sup> ) Versuche mit Fließmitteln; Herstellung von Funktionsmodellen mit strukturierten Oberflächen	203	

Stoffraumberechnung				
Überprüfung der Ausgangsrezepturen ( $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ )				
• Zement +	Holz +	Wasser		
410/3100	250/250	445/1000	= 1,577	m <sup>3</sup>
• Zement +	Holz +	Wasser		
410/3100	250/400	445/1000	= 1,202	m <sup>3</sup>
• Zement +	Holz +	Wasser		
410/3100	250/470	445/1000	= 1,109	m <sup>3</sup>
• Zement +	Holz +	Wasser		
410/3100	250/590	445/1000	= 1,001	m <sup>3</sup>
• Zement +	Holz +	Wasser		
410/3100	250/720	445/1000	= 0,924	m <sup>3</sup>

Abb. 10.0.1 Vorab durchgeführte Stoffraumberechnungen zur Ausgangsrezeptur  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ Abb. 10.0.2 ... und zur Ausgangsrezeptur  $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ 

Stoffraumberechnung				
Überprüfung der Ausgangsrezepturen ( $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ )				
• Zement +	Holz +	Wasser		
600/3100	135/250	280/1000	= 1,014	m <sup>3</sup>
• Zement +	Holz +	Wasser		
600/3100	135/400	280/1000	= 0,811	m <sup>3</sup>
• Zement +	Holz +	Wasser		
600/3100	135/470	280/1000	= 0,761	m <sup>3</sup>
• Zement +	Holz +	Wasser		
600/3100	135/590	280/1000	= 0,702	m <sup>3</sup>
• Zement +	Holz +	Wasser		
600/3100	135/720	280/1000	= 0,661	m <sup>3</sup>

Bestandteil	Rohdichte $\rho$	Schüttdichte (lose eingelaufen)
	kg/dm <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>
Zement	3,10 <sup>1</sup>	0,90–1,20
Holzpellets		0,65 <sup>4</sup>
(Nadel-)Holz	0,59 <sup>5</sup>	
(Nadel-)Holz	0,256	
Fichte	0,40–0,47 <sup>2</sup>	0,257 <sup>8</sup>
Nadelholz-Mix	0,72 <sup>3</sup>	0,17 <sup>3</sup>
Wasser	1,00	1,00
GR 41/GR 54	1,20 <sup>9</sup>	0,75 <sup>10</sup>

Abb. 10.0.3 Roh- und Schüttdichten der Mischungs-Bestandteile

<sup>1</sup> Ebeling et al., 12/1999, S. 6<sup>2</sup> Fichte (darrtrocken 0,40-0,43 kg/dm<sup>3</sup>; lufttrocken [15 %] 0,43-0,47 kg/dm<sup>3</sup>), Kiefer (Föhre) (darrtrocken 0,46-0,51 kg/dm<sup>3</sup>; lufttrocken [15%] 0,51-0,55 kg/dm<sup>3</sup>); vgl. Sell, 4/1997, S. 28<sup>3</sup> Gliniorz/Natterer, 2000, S. 30<sup>4</sup> Holzpellets der Größengruppe HP5 haben bei einem Durchmesser von 4 bis 10 mm eine Länge von unter 5 cm und eine Dichte von 1.000 bis 1.400 kg/m<sup>3</sup><sup>5</sup> Rechenwert der Ausgangsrezeptur  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ <sup>6</sup> ... Ausgangsrezeptur  $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ <sup>7</sup> Tel. Auskunft Fa. Künneth Holz & Logistik KG, Alling/Obb.; 09.04.2002<sup>8</sup> Untersuchung am Institut für Holzforschung der TU München, 02.05.2002<sup>9</sup> Tel. Auskunft Frau Kutzker, Fa. Rubitherm GmbH; 26.03.2002<sup>10</sup> Vgl. Datenblatt der Fa. RUBITHERM GmbH 20.10.2003

Rezeptur I a-b	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Anteil /Ges. Volumen berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/25 l	kg/25 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandkalksteinzement*	0,132	3,1	410	12	10,25	10,25	410	40
Nadelholz "Fichte" (250 kg/m <sup>3</sup> )	0,500	0,40	200	45	5,00	5,00	200	20
Wasser	0,445	1,00	445	40	11,13	8,99	360	35
Granulat GR 41 (20% v. Holz)	0,042	1,20	50	4	1,25	1,25	50	5
<b>Summe</b>	<b>1,12</b>			<b>100</b>				<b>100</b>

Abb. 10.1.1a Zusammensetzung der Rezeptur I a-b (MPA Bau/TU München; 06.09.2001)

\* Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL 32,5 R)

Abb. 10.1.1b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
Rezeptur I a-b (MPA Bau/TUM; 06.09.2001)

Rezeptur I a-b	
Konsistenz (8,99 l Wasser) [cm]	42,50
Luftporengehalt [%]	
W/Z-Wert	0,88
Frischbeton ρ [kg/dm <sup>3</sup> ]	

Abb. 10.1.1c Oberfläche der Rezeptur I a-b  
(Darstellung 1,25 : 1)



Rezeptur I c-d	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Anteil /Ges. Volumen berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/25 l	kg/25 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandkalksteinzement*	0,132	3,1	410	12	10,25	10,25	410	40
Nadelholz "Fichte" (250 kg/m <sup>3</sup> )	0,500	0,40	200	45	5,00	5,00	200	20
Wasser	0,445	1,00	445	40	11,13	8,99	360	35
Granulat GR 54 (20% v. Holz)	0,042	1,20	50	4	1,25	1,25	50	5
<b>Summe</b>	<b>1,12</b>			<b>100</b>				<b>100</b>

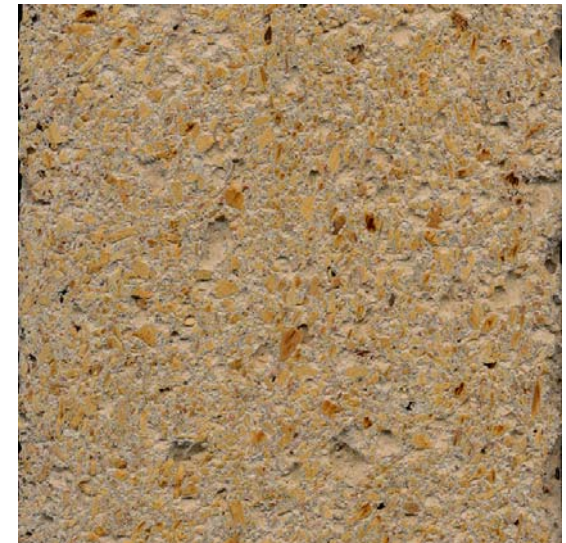
Abb. 10.1.2a Zusammensetzung der Rezeptur I c-d (MPA Bau/TU München; 06.09.2001)

\* Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL 32,5 R)

Abb. 10.1.2b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
Rezeptur I c-d (MPA Bau/TUM; 06.09.2001)

Rezeptur I c-d	
Konsistenz (8,99 l Wasser) [cm]	42,50
Luftporengehalt [%]	
W/Z-Wert	0,88
Frischbeton ρ [kg/dm <sup>3</sup> ]	

Abb. 10.1.2c Oberfläche der Rezeptur I c-d  
(Darstellung 1,25 : 1)





Rezeptur II a-b	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Anteil /Ges. Volumen berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/25 l	kg/25 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandkalksteinzement*	0,194	3,1	600	25	15,00	15,00	600	60
Nadelholz "Fichte" (135 kg/m <sup>3</sup> )	0,270	0,40	108	35	2,70	2,70	108	11
Wasser	0,280	1,00	280	37	7,00	6,43	257	26
Granulat GR 41 (20% v. Holz)	0,023	1,20	27	3	0,68	0,68	27	3
<b>Summe</b>	<b>0,77</b>			<b>100</b>				<b>100</b>

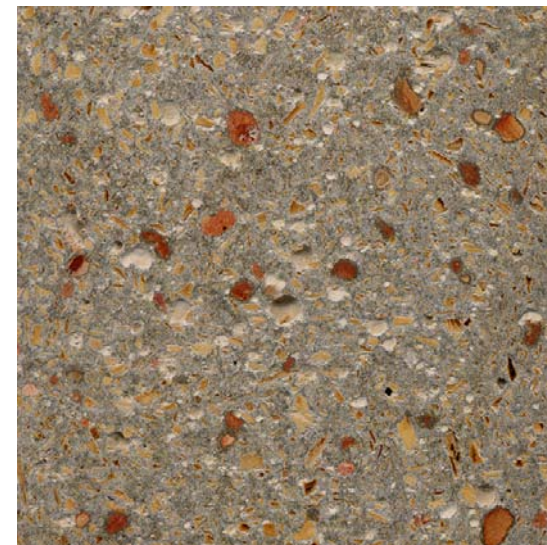
Abb. 10.1.3a Zusammensetzung der Rezeptur II a-b (MPA Bau/TU München; 06.09.2001)

\* Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL 32,5 R)

Abb. 10.1.3b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der Rezeptur II a-b (MPA Bau/TUM; 06.09.2001)

Rezeptur II a-b	
Konsistenz (6,43 l Wasser) [cm]	47,00
Luftporengehalt [%]	
W/Z-Wert	0,43
Frischbeton ρ [kg/dm <sup>3</sup> ]	

Abb. 10.1.3c Oberfläche der Rezeptur II a-b (Darstellung 1,25 : 1)



Rezeptur II c-d	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Anteil /Ges. Volumen berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/25 l	kg/25 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandkalksteinzement*	0,194	3,1	600	25	15,00	15,00	600	60
Nadelholz "Fichte" (135 kg/m <sup>3</sup> )	0,270	0,40	108	35	2,70	2,70	108	11
Wasser	0,280	1,00	280	37	7,00	6,60	264	26
Granulat GR 54 (20% v. Holz)	0,023	1,20	27	3	0,68	0,68	27	3
<b>Summe</b>	<b>0,77</b>			<b>100</b>				<b>100</b>

Abb. 10.1.4a Zusammensetzung der Rezeptur II c-d (MPA Bau/TU München; 06.09.2001)

\* Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL 32,5 R)

Abb. 10.1.4b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
Rezeptur II c-d (MPA Bau/TUM; 06.09.2001)

Rezeptur II c-d	
Konsistenz (6,60 l Wasser) [cm]	46,50
Luftporengehalt [%]	
W/Z-Wert	0,44
Frischbeton ρ [kg/dm <sup>3</sup> ]	

Abb. 10.1.4c Oberfläche der Rezeptur II c-d  
(Darstellung 1,25 : 1)



Rezeptur III a-b	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Anteil /Ges. Volumen berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/25 l	kg/25 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandkalksteinzement*	0,132	3,1	410	11	10,25	10,25	410	37
Nadelholz "Fichte"	0,625	0,40	250	50	6,25	6,25	250	22
Wasser	0,445	1,00	445	36	11,13	10,24	410	37
Granulat GR 41	0,042	1,20	50	3	1,25	1,25	50	4
<b>Summe</b>	<b>1,24</b>			<b>100</b>				<b>100</b>

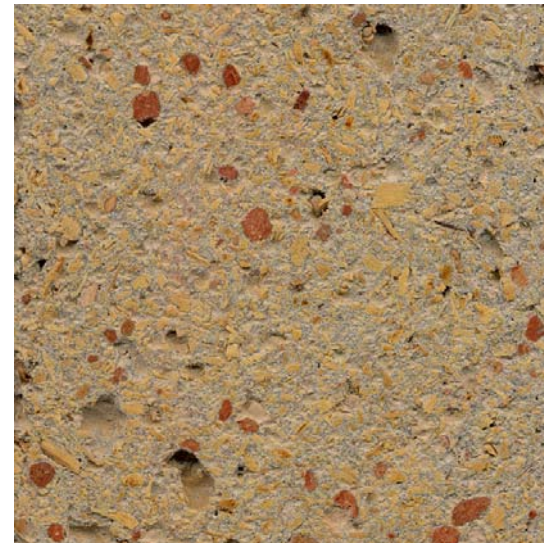
Abb. 10.1.5a Zusammensetzung der Rezeptur III a-b (MPA Bau/TU München; 06.09.2001)

\* Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL 32,5 R)

Abb. 10.1.5b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
 Rezeptur III a-b (MPA Bau/TUM; 06.09.2001)

Rezeptur III a-b	
Konsistenz (10,24 l Wasser) [cm]	43,50
Luftporengehalt [%]	
W/Z-Wert	1,00
Frischbeton ρ [kg/dm <sup>3</sup> ]	

Abb. 10.1.5c Oberfläche der Rezeptur III a-b  
 (Darstellung 1,25 : 1)



Rezepturen  
Betonage 1  
(06.09.2001)  
Rezeptur III c-d

Rezeptur III c-d	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Anteil /Ges. Volumen berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/25 l	kg/25 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandkalksteinzement*	0,132	3,1	410	11	10,25	10,25	410	37
Nadelholz "Fichte"	0,625	0,40	250	50	6,25	6,25	250	22
Wasser	0,445	1,00	445	36	11,13	10,24	410	37
Granulat GR 41	0,042	1,20	50	3	1,25	1,25	50	4
<b>Summe</b>	<b>1,24</b>			<b>100</b>				<b>100</b>

Abb. 10.1.6a Zusammensetzung der Rezeptur III c-d (MPA Bau/TU München; 06.09.2001)

\* Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL 32,5 R)

Abb. 10.1.6b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
Rezeptur III c-d (MPA Bau/TUM; 06.09.2001)

Rezeptur III c-d	
Konsistenz (10,24 l Wasser) [cm]	42,50
Luftporengehalt [%]	
W/Z-Wert	1,00
Frischbeton ρ [kg/dm <sup>3</sup> ]	

Abb. 10.1.6c Oberfläche der Rezeptur III c-d  
(Darstellung 1,25 : 1)



Rezeptur	Gewicht	Höhe*	Länge*	Breite*	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Druckfestig- keit $\beta_w$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Ia-b	3737	147	150	150	1,13	80,50	3,60
Ic-d	3651	147	150	150	1,10	105,60	4,80
IIa-b	1514	99	100	100	1,53	206,60	20,90
IIc-d	1513	99	100	100	1,53	194,70	19,70
IIIa-b	3594	147	150	150	1,09	105,90	4,80
IIIc-d	3169	146	150	150	0,96	58,60	2,70

Rezepturen  
Betonage 1  
(06.09.2001)  
MPA Kennwerte  
Rezepturen  
I a-b / III c-d

Abb. 10.1.7 Kennwerte der untersuchten Mischungen der Betonage I; Druckfestigkeit an Prüfwürfeln; Herstellungstag, 06.09.2001, Prüfungstag, 04.10.2001  
\* Prüfkörper verdichtet

Rezeptur I "30% GR 41" $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/100 l	kg/100 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,132	3,1	410	40	41,00	41,00	410	40
Nadelholz "Fichte" °	0,438	0,40	175	17	17,50	17,50	175	17
Wasser (75% von 445 kg/m <sup>3</sup> )	0,334	1,00	334	32	33,38	32,00	320	31
Granulat GR 41	0,096	1,20	116	11	11,58	11,58	116	11
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>	<b>103</b>	<b>102</b>	<b>0,986</b>	<b>100</b>

Abb. 10.2.1a Zusammensetzung der Rezeptur I (MPA Bau/TU München; 13.05.2002)

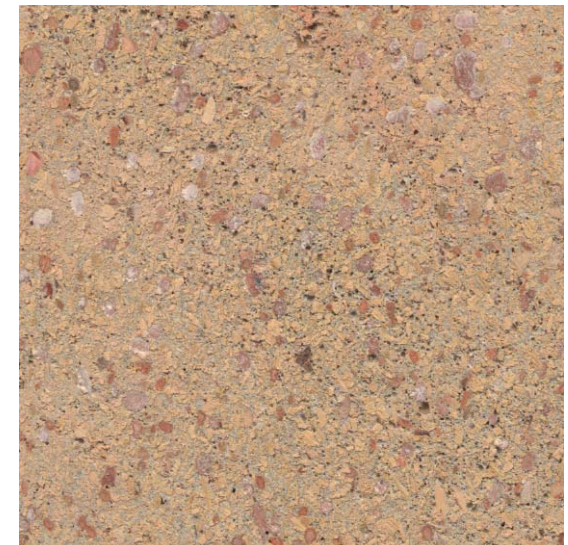
\* Portlandzement (CEM I 32,5 R)

° Holzfeuchtegehalt 117 %

Abb. 10.2.1b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
Rezeptur I (MPA Bau/TUM; 13.05.2002)

Rezeptur I "30% GR 41" $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	
Konsistenz (30 l Wasser) [cm]	34,5
Konsistenz KR (32 l Wasser) [cm]	46
Luftporengehalt [%]	17
W/Z-Wert	0,78
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,067
Wasseranteil (x/445) [%]	72

Abb. 10.2.1c Oberfläche der Rezeptur I (rauh)  
(Darstellung 1:1)



Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	ø	Prüfhöhe	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Druckfestig- keit $\beta_{\text{Zyl.}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
I/1	5497	299	150	301	1,04	72,90	4,13
I/2	5386	299	150	301	1,02	70,20	3,97
Kleinsten Einzelwert					1,02		3,97
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,03</b>		<b>4,05</b>

Abb. 10.2.1d Rezeptur I "30% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Druckfestigkeit am Zylinder; Herstelltag: 13.05.2002, Prüftag: 10.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe	ø	Rohdichte $\rho$	Untere Prüf- spannung $\sigma_u$	Obere Prüf- spannung $\sigma_o$	E-Modul $E_\beta$
	[g]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
I/3	5453	298	150	1,04	0,50	1,40	1600
I/4	5500	298	150	1,04	0,50	1,40	1600
I/5	5470	298	150	1,04	0,50	1,40	1600
Kleinsten Einzelwert				1,04			1600
<b>Mittelwert:</b>				<b>1,04</b>			<b>1600</b>

Abb. 10.2.1e Rezeptur I "30% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Statischer Elastizitätsmodul am Zylinder; Herstelltag: 13.05.2002, Prüftag: 10.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	Länge	Breite	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Biegezug- festigkeit $\beta_{\text{Bz}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
I/1	15400	150	700	148	0,99	9,80	1,77
I/2	15680	150	700	150	1,00	7,58	1,35
I/3	16680	150	700	150	1,06	9,06	1,61
Kleinsten Einzelwert					0,99		1,35
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,02</b>		<b>1,57</b>

Abb. 10.2.1f Rezeptur I "30% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Biegezugfestigkeit am Balken; Herstelltag: 13.05.2002, Prüftag: 10.06.2002, Prüfer: Numberger

Rezeptur II "35% GR 41" $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/100 l	kg/100 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,132	3,1	410	39	41,00	41,00	410	40
Nadelholz "Fichte" °	0,406	0,40	163	15	16,25	16,25	163	16
Wasser (75% von 445 kg/m <sup>3</sup> )	0,334	1,00	334	31	33,38	31,00	310	30
Granulat GR 41	0,128	1,20	153	14	15,33	15,33	153	15
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>	<b>106</b>	<b>104</b>	<b>0,976</b>	<b>100</b>

Abb. 10.2.2a Zusammensetzung der Rezeptur II (MPA Bau/TU München; 13.05.2002)

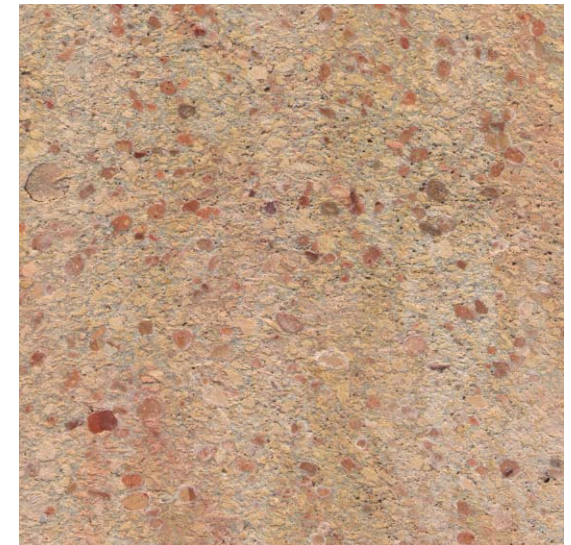
\* Portlandzement (CEM I 32,5 R)

° Holzfeuchtegehalt 117 %

Abb. 10.2.2b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
Rezeptur II (MPA Bau/TUM; 13.05.2002)

Rezeptur II "35% GR 41" $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	
Konsistenz KR (31 l Wasser) [cm]	44,50
Luftporengehalt [%]	20
W/Z-Wert	0,76
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,118
Wasseranteil (x/445) [%]	70

Abb. 10.2.2c Oberfläche der Rezeptur II (rauh)  
(Darstellung 1:1)





Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	ø	Prüfhöhe	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Druckfestig- keit $\beta_{\text{Zyl.}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
II/1	5703	300	150	301	1,08	90,80	5,14
II/2	5874	299	150	301	1,11	79,70	4,51
Kleinsten Einzelwert					1,08		4,51
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,09</b>		<b>4,82</b>

Abb. 10.2.2d Rezeptur II "35% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Druckfestigkeit am Zylinder; Herstelltag: 13.05.2002, Prüftag: 10.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe	ø	Rohdichte $\rho$	Untere Prüf- spannung $\sigma_u$	Obere Prüf- spannung $\sigma_o$	E-Modul $E_\beta$
	[g]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
II/3	5599	300	150	1,06	0,50	1,60	2000
II/4	5829	300	150	1,10	0,50	1,60	1900
II/5	5749	300	150	1,08	0,50	1,60	1900
Kleinsten Einzelwert				1,04			1900
<b>Mittelwert:</b>				<b>1,04</b>			<b>1933</b>

Abb. 10.2.2e Rezeptur II "35% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Statischer Elastizitätsmodul am Zylinder; Herstelltag: 13.05.2002, Prüftag: 10.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	Länge	Breite	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Biegezug- festigkeit $\beta_{\text{Bz}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
II/1	16920	150	701	150	1,07	10,45	1,86
II/2	17330	150	701	150	1,10	10,66	1,90
II/3	16140	150	700	150	1,02	9,49	1,69
Kleinsten Einzelwert					1,02		1,69
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,07</b>		<b>1,81</b>

Abb. 10.2.2f Rezeptur II "35% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Biegezugfestigkeit am Balken; Herstelltag: 13.05.2002, Prüftag: 10.06.2002, Prüfer: Numberger

Rezeptur III "40% GR 41 $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	Stoffraum	Korn- roh-dichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/150 l	kg/150 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,132	3,1	410	38	61,50	61,50	410	38
Nadelholz "Fichte" °	0,375	0,40	150	14	22,50	22,50	150	14
Wasser (75% von 445 kg/m <sup>3</sup> )	0,334	1,00	334	31	50,06	49,00	327	30
Granulat GR 41	0,159	1,20	191	18	28,62	28,62	191	18
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>	<b>163</b>	<b>162</b>	<b>0,993</b>	<b>100</b>

Abb. 10.2.3a Zusammensetzung der Rezeptur III (MPA Bau/TU München; 13.05.2002)

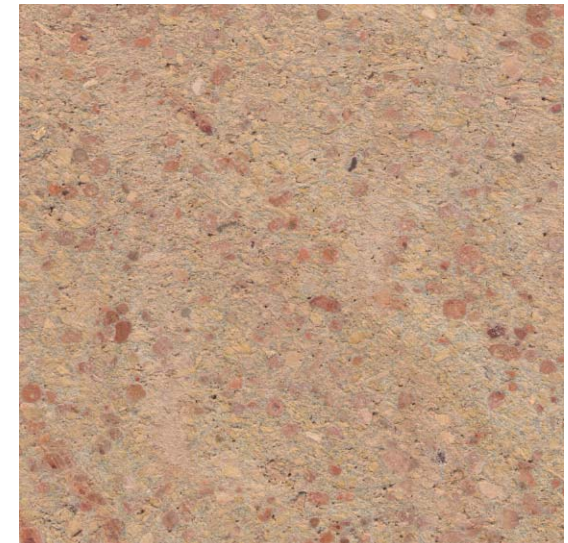
\* Portlandzement (CEM I 32,5 R)

° Holzfeuchtegehalt 117 %

Abb. 10.2.3b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
Rezeptur III (MPA Bau/TUM; 13.05.2002)

Rezeptur III "40% GR 41 $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	
Konsistenz (46,5 l Wasser) [cm]	31,00
Konsistenz (48 l Wasser) [cm]	41,00
Konsistenz KR (49 l Wasser) [cm]	45,00
Luftporengehalt [%]	17
W/Z-Wert	0,80
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,079
Wasseranteil (x/445) [%]	73

Abb. 10.2.3c Oberfläche der Rezeptur III (rauh)  
(Darstellung 1:1)



Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	ø	Prüfhöhe	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Druckfestig- keit $\beta_{\text{Zyl.}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
III/1	5585	300	150	301	1,05	79,90	4,52
III/2	5454	299	150	301	1,03	84,00	4,75
Kleinsten Einzelwert					1,03		4,52
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,04</b>		<b>4,64</b>

Abb. 10.2.3d Rezeptur III "40% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Druckfestigkeit am Zylinder; Herstelltag: 13.05.2002, Prüftag: 10.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe	ø	Rohdichte $\rho$	Untere Prüf- spannung $\sigma_u$	Obere Prüf- spannung $\sigma_o$	E-Modul $E_\beta$
	[g]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
III/3	5620	300	150	1,06	0,50	1,60	1900
III/4	5591	300	150	1,05	0,50	1,60	1800
III/5	5542	299	150	1,05	0,50	1,60	1800
Kleinsten Einzelwert				1,05			1800
<b>Mittelwert:</b>				<b>1,05</b>			<b>1833</b>

Abb. 10.2.3e Rezeptur III "40% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Statischer Elastizitätsmodul am Zylinder; Herstelltag: 13.05.2002, Prüftag: 10.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	Länge	Breite	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Biegezug- festigkeit $\beta_{\text{Bz}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
III/1	16090	150	700	149	1,03	9,26	1,66
III/2	15960	150	700	148	1,03	8,69	1,57
III/3	16000	150	700	148	1,03	9,26	1,67
III/4	15860	150	700	148	1,02	8,95	1,61
III/5	15750	150	700	148	1,01	8,33	1,50
Kleinsten Einzelwert					1,01		1,50
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,02</b>		<b>1,60</b>

Abb. 10.2.3f Rezeptur III "40% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Biegezugfestigkeit am Balken; Herstelltag: 13.05.2002, Prüftag: 10.06.2002, Prüfer: Numberger

Rezeptur IV "45% GR 41 $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/100 l	kg/100 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,132	3,1	410	37	41,00	41,00	410	36
Nadelholz "Fichte"	0,344	0,40	138	12	13,75	13,75	138	12
Wasser (75% von 445 kg/m <sup>3</sup> )	0,334	1,00	334	30	33,38	35,80	358	32
Granulat GR 41	0,190	1,20	228	21	22,83	22,83	228	20
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>	<b>111</b>	<b>113</b>	<b>1,024</b>	<b>100</b>

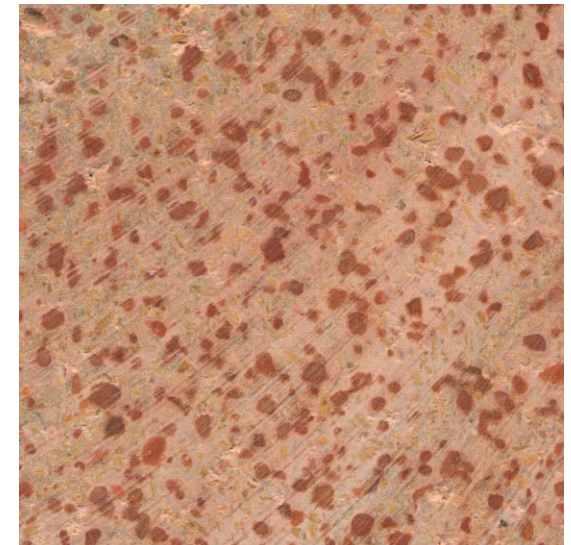
Abb. 10.2.4a Zusammensetzung der Rezeptur IV (MPA Bau/TU München; 16.05.2002)

- \* Portlandzement (CEM I 32,5 R)
- Holzfeuchtegehalt 117 %

Abb. 10.2.4b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
Rezeptur IV (MPA Bau/TUM; 16.05.2002)

Rezeptur IV "45% GR 41 $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	
Konsistenz (34,8 l Wasser) [cm]	40,50
Konsistenz KR (35,8 l Wasser) [cm]	46,00
Luftporengehalt [%]	18
W/Z-Wert	0,87
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,153
Wasseranteil (x/445) [%]	80

Abb. 10.2.4c Oberfläche der Rezeptur IV (rauh)  
(Darstellung 1:1)



Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	ø	Prüfhöhe	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Druckfestig- keit $\beta_{\text{Zyl.}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
IV/1	5462	298	150	300	1,04	86,00	4,87
IV/2	5672	298	150	300	1,08	87,20	4,93
Kleinsten Einzelwert					1,04		4,87
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,06</b>		<b>4,90</b>

Abb. 10.2.4d Rezeptur IV "45% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Druckfestigkeit am Zylinder; Herstelltag: 16.05.2002, Prüftag: 13.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe	ø	Rohdichte $\rho$	Untere Prüf- spannung $\sigma_u$	Obere Prüf- spannung $\sigma_o$	E-Modul $E_\beta$
	[g]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
IV/3	5677	298	150	1,08	0,50	1,60	1700
IV/4	5669	298	150	1,08	0,50	1,60	1700
IV/5	5696	298	150	1,08	0,50	1,60	2000
Kleinsten Einzelwert				1,08			1700
<b>Mittelwert:</b>				<b>1,08</b>			<b>1800</b>

Abb. 10.2.4e Rezeptur IV "45% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Statischer Elastizitätsmodul am Zylinder; Herstelltag: 16.05.2002, Prüftag: 13.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	Länge	Breite	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Biegezug- festigkeit $\beta_{\text{Bz}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
IV/1	17020	150	700	151	1,07	8,92	1,58
IV/2	16680	150	700	149	1,07	8,51	1,52
IV/3	16600	150	700	149	1,06	9,76	1,75
Kleinsten Einzelwert					1,06		1,52
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,07</b>		<b>1,62</b>

Abb. 10.2.4f Rezeptur IV "45% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Biegezugfestigkeit am Balken; Herstelltag: 16.05.2002, Prüftag: 13.06.2002, Prüfer: Numberger

Rezeptur V "50% GR 41 $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/150 l	kg/150 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,132	3,1	410	36	61,50	61,50	410	36
Nadelholz "Fichte" °	0,313	0,40	125	11	18,75	18,75	125	11
Wasser (75% von 445 kg/m <sup>3</sup> )	0,334	1,00	334	29	50,06	52,50	350	30
Granulat GR 41	0,221	1,20	266	23	39,87	39,87	266	23
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>	<b>170</b>	<b>173</b>	<b>1,016</b>	<b>100</b>

Abb. 10.2.5a Zusammensetzung der Rezeptur V (MPA Bau/TU München; 16.05.2002)

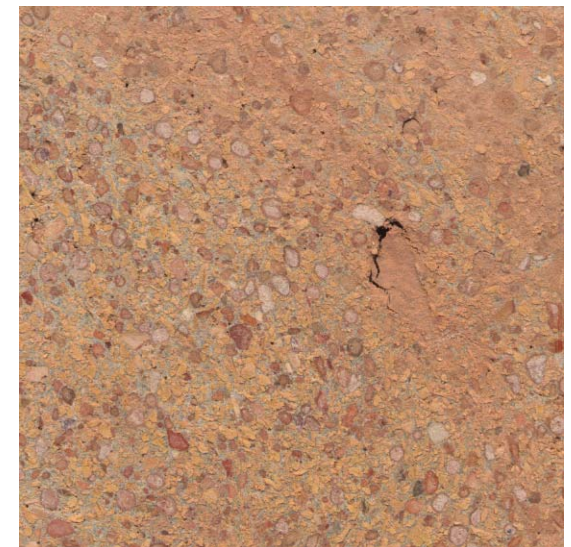
\* Portlandzement (CEM I 32,5 R)

° Holzfeuchtegehalt 117 %

Abb. 10.2.5b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
 Rezeptur V (MPA Bau/TUM; 16.05.2002)

Rezeptur V "50% GR 41 $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	
Konsistenz KR (52,5 l Wasser) [cm]	44,00
Luftporengehalt [%]	13
W/Z-Wert	0,85
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,268
Wasseranteil (x/445) [%]	79

Abb. 10.2.5c Oberfläche der Rezeptur V (rauh)  
 (Darstellung 1:1)



Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	ø	Prüfhöhe	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Druckfestig- keit $\beta_{\text{Zyl.}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
V/1	6145	300	150	301	1,16	109,60	6,20
V/2	6069	299	150	300	1,15	108,40	6,13
Kleinsten Einzelwert					1,15		6,13
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,16</b>		<b>6,17</b>

Abb. 10.2.5d Rezeptur V "50% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Druckfestigkeit am Zylinder; Herstelltag: 16.05.2002, Prüftag: 13.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe	ø	Rohdichte $\rho$	Untere Prüf- spannung $\sigma_u$	Obere Prüf- spannung $\sigma_o$	E-Modul $E_\beta$
	[g]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
V/3	6201	300	150	1,17	0,50	2,10	2100
V/4	6068	299	150	1,15	0,50	2,10	2200
V/5	6145	300	150	1,16	0,50	2,10	2300
Kleinsten Einzelwert				1,15			2100
<b>Mittelwert:</b>				<b>1,16</b>			<b>2200</b>

Abb. 10.2.5e Rezeptur V "50% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Statischer Elastizitätsmodul am Zylinder; Herstelltag: 16.05.2002, Prüftag: 13.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	Länge	Breite	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Biegezug- festigkeit $\beta_{\text{Bz}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
V/1	18520	150	700	150	1,18	10,94	1,94
V/2	18660	150	700	151	1,18	11,83	2,09
V/3	18300	150	700	149	1,17	11,38	2,04
V/4	19070	151	700	150	1,20	11,27	1,98
V/5	18980	149	700	151	1,21	10,99	1,97
Kleinsten Einzelwert					1,17		1,94
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,19</b>		<b>2,00</b>

Abb. 10.2.5f Rezeptur V "50% GR 41",  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Biegezugfestigkeit am Balken; Herstelltag: 16.05.2002, Prüftag: 13.06.2002, Prüfer: Numberger

Rezeptur VI "5% GR 41" $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	150 l	150 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,194	3,1	600	47	90,00	90,00	600	44
Nadelholz "Fichte" °	0,321	0,40	128	10	19,24	18,23	122	9
Wasser (75% von 280 kg/m <sup>3</sup> )	0,210	1,00	210	17	31,50	46,00	307	23
Granulat GR 41	0,276	1,20	331	26	49,65	49,65	331	24
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>	<b>190</b>	<b>204</b>	<b>1,080</b>	<b>100</b>

Abb. 10.2.6a Zusammensetzung der Rezeptur VI (MPA Bau/TU München; 13.05.2002)

\* Portlandzement (CEM I 32,5 R)

° Holzfeuchtegehalt 117 %

Abb. 10.2.6b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
Rezeptur VI (MPA Bau/TUM; 13.05.2002)

Rezeptur VI "5% GR 41" $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$	
Konsistenz (29 l Wasser) [cm]	k. Abm.
Konsistenz (34 l Wasser) [cm]	k. Abm.
Konsistenz (39 l Wasser) [cm]	k. Abm.
Konsistenz (44 l Wasser) [cm]	37,50
Konsistenz KR (46 l Wasser) [cm]	42,50
Luftporengehalt [%]	13
W/Z-Wert	0,51
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,334
Wasseranteil (x/280) [%]	110

Abb. 10.2.6c Oberfläche der Rezeptur VI (rauh)  
(Darstellung 1:1)



Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	ø	Prüfhöhe	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Druckfestig- keit $\beta_{\text{Zyl.}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
VI/1	6875	299	150	301	1,30	210,30	11,90
VI/2	6817	299	150	300	1,29	222,40	12,59
Kleinsten Einzelwert					1,29		11,90
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,30</b>		<b>12,24</b>

Abb. 10.2.6d Rezeptur VI "5% GR 41"  $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ ; Druckfestigkeit am Zylinder; Herstelltag: 13.05.2002, Prüftag: 10.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe	ø	Rohdichte $\rho$	Untere Prüf- spannung $\sigma_u$	Obere Prüf- spannung $\sigma_o$	E-Modul $E_\beta$
	[g]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
VI/3	6840	300	150	1,29	0,50	4,10	3500
VI/4	6868	299	150	1,30	0,50	4,10	3500
VI/5	6844	298	150	1,30	0,50	4,10	3600
Kleinsten Einzelwert				1,29			3500
<b>Mittelwert:</b>				<b>1,30</b>			<b>3533</b>

Abb. 10.2.6e Rezeptur VI "5% GR 41"  $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ ; Statischer Elastizitätsmodul am Zylinder; Herstelltag: 13.05.2002, Prüftag: 10.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	Länge	Breite	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Biegezug- festigkeit $\beta_{\text{Bz}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
VI/1	20890	150	700	151	1,32	15,51	2,74
VI/2	21000	151	700	151	1,32	12,96*	2,26
VI/3	20960	150	700	151	1,32	14,44	2,55
VI/4	20900	151	700	150	1,32	14,19	2,49
Kleinsten Einzelwert					1,32		2,26
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,32</b>		<b>2,51</b>

Abb. 10.2.6f Rezeptur VI "5% GR 41"  $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ ; Biegezugfestigkeit am Balken; Herstelltag: 13.05.2002, Prüftag: 10.06.2002, Prüfer: Numberger

Rezeptur VII "20% GR 54" $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	$\text{m}^3$	$\text{kg/dm}^3$	$\text{kg/m}^3$	%	$\text{kg/100 l}$	$\text{kg/100 l}$	$\text{kg/m}^3$	%
Portlandzement CEM I*	0,194	3,1	600	46	60,00	60,00	600	41
Nadelholz "Fichte" °	0,270	0,40	108	8	10,80	10,80	108	7
Wasser (75% von $280 \text{ kg/m}^3$ )	0,210	1,00	210	16	21,00	37,00	370	25
Granulat GR 41	0,326	1,20	392	30	39,17	39,17	392	27
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>	<b>131</b>	<b>147</b>	<b>1,160</b>	<b>100</b>

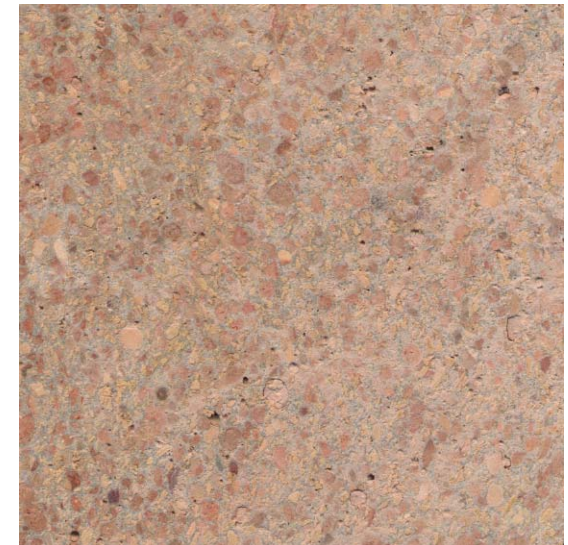
Abb. 10.2.7a Zusammensetzung der Rezeptur VII (MPA Bau/TU München; 16.05.2002)

\* Portlandzement (CEM I 32,5 R)

° Holzfeuchtegehalt 117 %

Abb. 10.2.7b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
Rezeptur VII (MPA Bau/TUM; 16.05.2002)

Rezeptur VII "20% GR 54" $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$	
Konsistenz (21 l Wasser) [cm]	k. Abm.
Konsistenz (25 l Wasser) [cm]	k. Abm.
Konsistenz (30 l Wasser) [cm]	k. Abm.
Konsistenz (36 l Wasser) [cm]	40,00
Konsistenz KR (37 l Wasser) [cm]	43,00
Luftporengehalt [%]	10
W/Z-Wert	0,62
Frischbeton $\rho$ [ $\text{kg/dm}^3$ ]	1,391
Wasseranteil ( $x/280$ ) [%]	132

Abb. 10.2.7c Oberfläche der Rezeptur VII (rauh)  
(Darstellung 1:1)

Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	∅	Prüfhöhe	Rohdichte ρ	Bruchlast F	Druckfestig- keit β <sub>zyl.</sub>
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
VII/1	7131	301	150	302	1,34	206,60	11,69
VII/2	7128	302	150	303	1,34	203,80	11,53
Kleinster Einzelwert					1,34		11,53
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,34</b>		<b>11,61</b>

Abb. 10.2.7d Rezeptur VII "20% GR 54" ρ ≈ 600 kg/m<sup>3</sup>; Druckfestigkeit am Zylinder; Herstelltag: 16.05.2002, Prüftag: 13.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe	∅	Rohdichte ρ	Untere Prüf- spannung σ <sub>u</sub>	Obere Prüf- spannung σ <sub>o</sub>	E-Modul E <sub>β</sub>
	[g]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
VII/3	7112	300	150	1,34	0,50	3,90	3200
VII/4	7140	299	150	1,35	0,50	3,90	3500
VII/5	7142	298	150	1,36	0,50	3,90	3500
Kleinster Einzelwert				1,34			3200
<b>Mittelwert:</b>				<b>1,35</b>			<b>3400</b>

Abb. 10.2.7e Rezeptur VII "20% GR 54" ρ ≈ 600 kg/m<sup>3</sup>; Statischer Elastizitätsmodul am Zylinder; Herstelltag: 16.05.2002, Prüftag: 13.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	Länge	Breite	Rohdichte ρ	Bruchlast F	Biegezug- festigkeit β <sub>BZ</sub>
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
VII/1	21480	150	700	151	1,35	12,22	2,16
VII/2	21270	150	700	150	1,35	12,20	2,26
VII/3	21350	150	700	150	1,36	13,11	2,33
Kleinster Einzelwert					1,35		2,16
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,35</b>		<b>2,25</b>

Abb. 10.2.7f Rezeptur VII "20% GR 54" ρ ≈ 1250 kg/m<sup>3</sup>; Biegezugfestigkeit am Balken; Herstelltag: 16.05.2002, Prüftag: 13.06.2002, Prüfer: Nummerger

Rezeptur VIII "30% GR 54" $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/100 l	kg/100 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,194	3,1	600	45	60,00	60,00	600	40
Nadelholz "Fichte"	0,236	0,40	95	7	9,45	9,45	95	6
Wasser (75% von 280 kg/m <sup>3</sup> )	0,210	1,00	210	16	21,00	36,00	360	24
Granulat GR 54	0,360	1,20	432	32	43,22	43,22	432	29
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>	<b>134</b>	<b>149</b>	<b>1,150</b>	<b>100</b>

Abb. 10.2.8a Zusammensetzung der Rezeptur VIII (MPA Bau/TU München; 16.05.2002)

- \* Portlandzement (CEM I 32,5 R)
- Holzfeuchtegehalt 117 %

Abb. 10.2.8b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
Rezeptur VIII (MPA Bau/TUM; 16.05.2002)

Rezeptur VIII "30% GR 54" $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$	
Konsistenz KR (36 l Wasser) [cm]	45,00
Luftporengehalt [%]	5,6
W/Z-Wert	0,60
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,488
Wasseranteil (x/280) [%]	129

Abb. 10.2.8c Oberfläche der Rezeptur VIII (rauh)  
(Darstellung 1:1)



Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	ø	Prüfhöhe	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Druckfestig- keit $\beta_{\text{Zyl.}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
VIII/1	7550	301	150	302	1,42	294,90	16,69
VIII/2	7501	301	150	302	1,41	294,10	16,64
Kleinsten Einzelwert					1,41		16,64
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,42</b>		<b>16,67</b>

Abb. 10.2.8d Rezeptur VIII "30% GR 41"  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Druckfestigkeit am Zylinder; Herstelltag: 16.05.2002, Prüftag: 13.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe	ø	Rohdichte $\rho$	Untere Prüf- spannung $\sigma_u$	Obere Prüf- spannung $\sigma_o$	E-Modul $E_\beta$
	[g]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
VIII / 3	7452	300	150	1,41	0,50	5,60	4400
VIII / 4	7481	301	150	1,41	0,50	5,60	4400
VIII / 5	7429	300	150	1,40	0,50	5,60	4500
Kleinsten Einzelwert				1,40			4400
<b>Mittelwert:</b>				<b>1,40</b>			<b>4433</b>

Abb. 10.2.8e Rezeptur VIII "30% GR 41"  $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ ; Statischer Elastizitätsmodul am Zylinder; Herstelltag: 16.05.2002, Prüftag: 13.06.2002, Prüfer: Hribar

Prüfkörper	Gewicht	Höhe/ Bruchhöhe	Länge	Breite	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Biegezug- festigkeit $\beta_{\text{Bz}}$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
VIII /1	22630	150	700	150	1,44	10,63	1,89
VIII /2	22540	150	700	150	1,43	11,23	2,26
VIII /3	22720	150	700	150	1,44	10,44	1,86
Kleinsten Einzelwert					1,43		1,86
<b>Mittelwert:</b>					<b>1,44</b>		<b>2,00</b>

Abb. 10.2.8f Rezeptur VIII "30% GR 41"  $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ ; Biegezugfestigkeit am Balken; Herstelltag: 16.05.2002, Prüftag: 13.06.2002, Prüfer: Numberger

Rezeptur III "40% GR 41 $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/≈54 l	kg/≈54 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,132	3,1	410	38	22,11	22,11	410	31
(Nadel-)Holz "Fichte" <sup>o</sup>	0,375	0,40	150	14	8,09	8,09	150	11
Wasser (75% von 445 kg/m <sup>3</sup> )	0,334	1,00	334	31	18,00	31,92	592	44
Granulat GR 41	0,159	1,20	191	18	10,29	10,29	191	14
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>				<b>100</b>

Abb. 10.3.1a Zusammensetzung der Rezeptur III (MPA Bau/TU München; 16.05.2002)

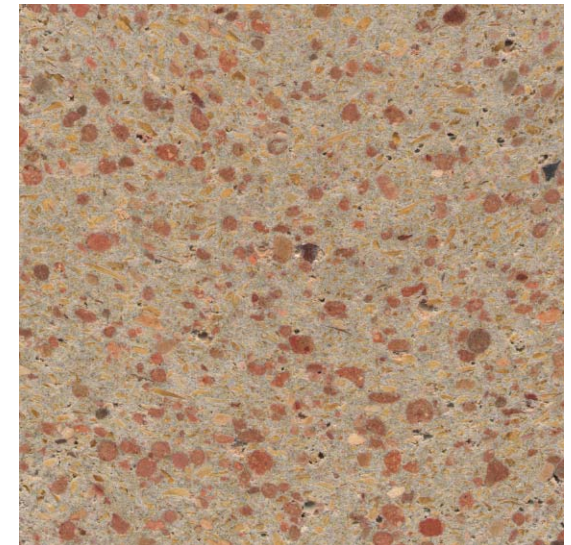
- \* Portlandzement (CEM I 32,5 R)
- o Holzfeuchtegehalt zwischen 9,73 % und 9,86 %

Abb. 10.3.1b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der Rezeptur III (MPA Bau/TUM; 10.01.2003)

- \* Auf Regelkonsistenz wird verzichtet, da der Frischbeton bereits nach Augenschein und in Abstimmung mit den Betonprüfern eine gute Verarbeitbarkeit aufweist

Rezeptur III "40% GR 41 $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	
Konsistenz (27 l Wasser) [cm]	k. Abm.
Konsistenz (30 l Wasser) [cm]	34,00
Konsistenz (31,92 l Wasser) [cm]*	39,00
Luftporengehalt [%]	
W/Z-Wert	1,44
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	
Wasseranteil (x/445) [%]	

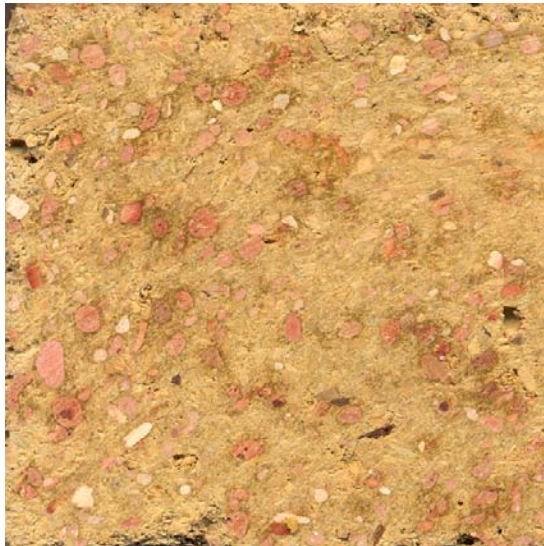
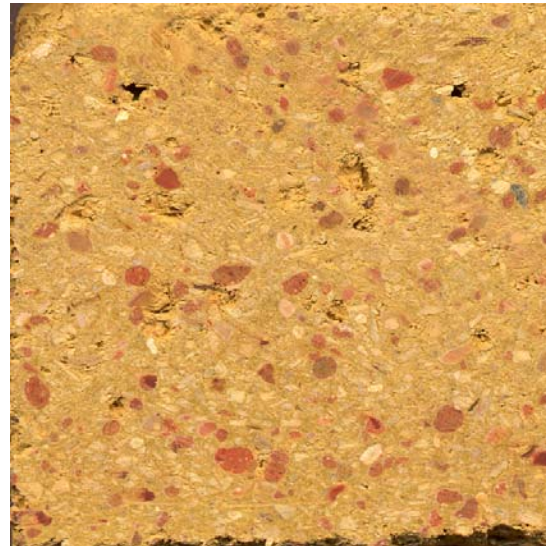
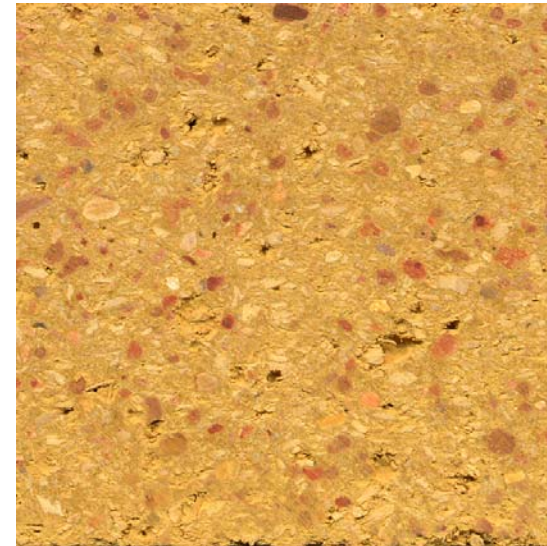
Abb. 10.3.1c Oberfläche der Rezeptur III (glatt)  
(Darstellung 1:1)



Rezeptur III "40% GR 41 $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage	Rest- Betonage für Farb- muster	Farb- Zuschlag flüssig	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	$\text{m}^3$	$\text{kg/dm}^3$	$\text{kg/m}^3$	%	$\text{kg}/\approx 54 \text{ l}$		kg	%
Portlandzement CEM I*	0,132	3,1	410	38	22,11			31
(Nadel-)Holz "Fichte"	0,375	0,40	150	14	8,09			11
Wasser (75% von $445 \text{ kg/m}^3$ )	0,334	1,00	334	31	31,92			44
Granulat GR 41	0,159	1,20	191	18	10,29			14
Farbpigment $\approx 2 \text{ \%}^\#$						$\Sigma = 39,0$	1,56	
Farbpigment $\approx 5 \text{ \%}^\#$						$\Sigma = 28,3$	1,70	
Farbpigment $\approx 8 \text{ \%}^\#$						$\Sigma = 16,8$	1,01	
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>				

Abb. 10.3.2a Zusammensetzung der Rezeptur III; \* Portlandzement (CEM I 32,5 R); ° Holzfeuchtegehalt zwischen 9,73 % und 9,86 %

# Multiplikator Flüssigfarbe ("Gelb, # 420") = 2 (bezogen auf die Gesamt-Restmasse)

Abb. 10.3.2b Oberfläche der Rezeptur III  
Farbmuster "Gelb, # 420" ( $\approx 2 \text{ \%}$ )  
(Darstellung 1,25 : 1)Abb. 10.3.2c Oberfläche der Rezeptur III  
Farbmuster "Gelb, # 420" ( $\approx 5 \text{ \%}$ )  
(Darstellung 1,25 : 1)Abb. 10.3.2d Oberfläche der Rezeptur III  
Farbmuster "Gelb, # 420" ( $\approx 8 \text{ \%}$ )  
(Darstellung 1,25 : 1)

Rezeptur VI "5% GR 41" $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/≈54 l	kg/≈54 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,194	3,1	600	47	32,35	32,35	600	37
(Nadel-)Holz "Fichte" <sup>o</sup>	0,321	0,40	128	10	6,92	6,92	128	8
Wasser (75% von 280 kg/m <sup>3</sup> )	0,210	1,00	210	17	11,32	29,32	544	34
Granulat GR 41	0,276	1,20	331	26	17,85	17,85	331	21
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>				

Abb. 10.3.3a Zusammensetzung der Rezeptur VI (MPA Bau/TU München; 16.05.2002)

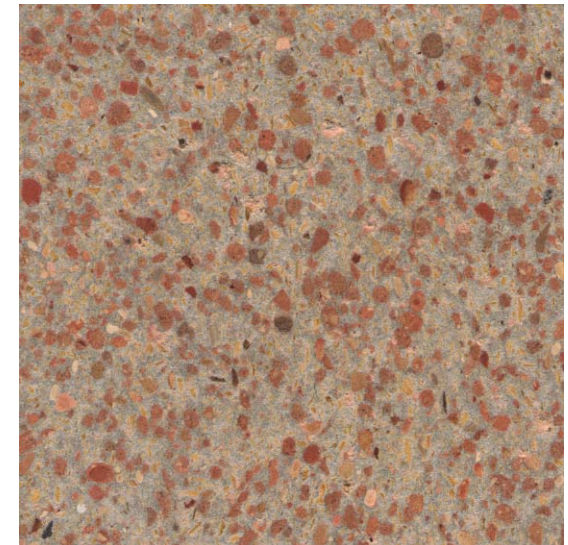
- \* Portlandzement (CEM I 32,5 R)
- o Holzfeuchtegehalt zwischen 9,73 % und 9,86 %

Abb. 10.3.3b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der Rezeptur VI (MPA Bau/TUM; 10.01.2003)

- \* Auf Regelkonsistenz wird verzichtet, da der Frischbeton bereits nach Augenschein und in Abstimmung mit den Betonprüfern eine gute Verarbeitbarkeit aufweist

Rezeptur VI "5% GR 41" $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$	
Konsistenz (29,32 l Wasser) [cm]*	40,00
Luftporengehalt [%]	
W/Z-Wert	0,91
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	
Wasseranteil (x/280) [%]	

Abb. 10.3.3c Oberfläche der Rezeptur VI (glatt)  
(Darstellung 1:1)

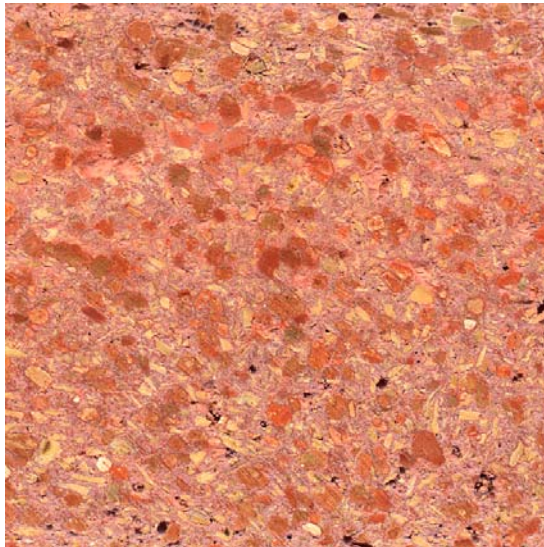
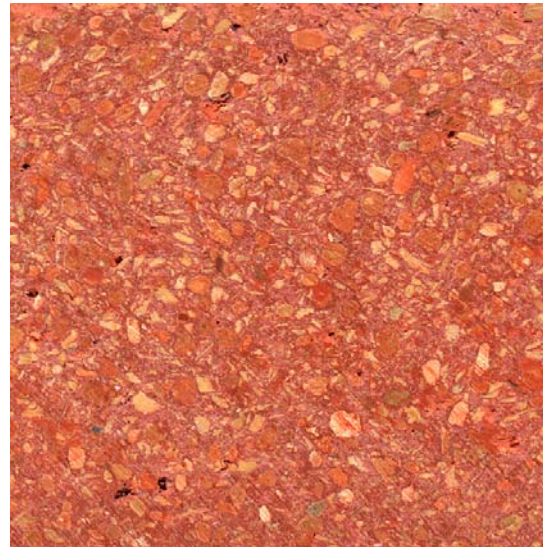
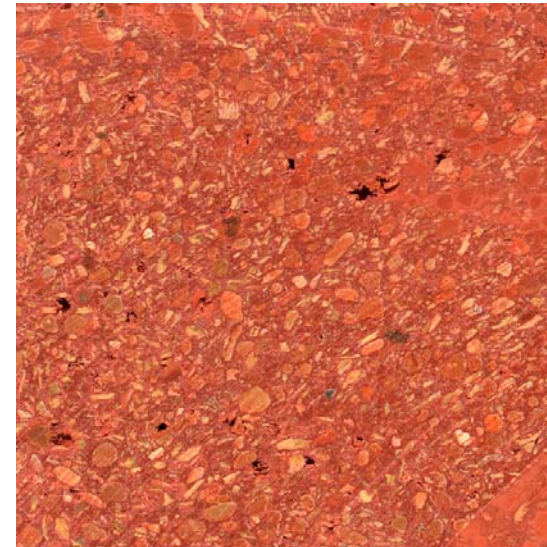




Rezeptur VI "5% GR 41" $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage	Rest- Betonage für Farb- muster	Farb- Zuschlag flüssig	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	$\text{m}^3$	$\text{kg/dm}^3$	$\text{kg/m}^3$	%	$\text{kg}/\approx 54 \text{ l}$		kg	%
Portlandzement CEM I*	0,194	3,1	600	47	32,35			37
(Nadel-)Holz "Fichte"	0,321	0,40	128	10	6,92			8
Wasser (75% von $280 \text{ kg/m}^3$ )	0,210	1,00	210	17	29,32			34
Granulat GR 41	0,276	1,20	331	26	17,85			21
Farbpigment $\approx 2 \text{ \%}^\#$						$\Sigma = 44,0$	1,47	
Farbpigment $\approx 5 \text{ \%}^\#$						$\Sigma = 33,65$	1,69	
Farbpigment $\approx 8 \text{ \%}^\#$						$\Sigma = 21,7$	1,09	
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>				

Abb. 10.3.4a Zusammensetzung der Rezeptur VI; \* Portlandzement (CEM I 32,5 R); ° Holzfeuchtegehalt zwischen 9,73 % und 9,86 %

# Multiplikator Flüssigfarbe ("Rot, # 110") = 1,67 (bezogen auf die Gesamt-Restmasse)

Abb. 10.3.4b Oberfläche der Rezeptur VI  
Farbmuster "Rot, # 110" ( $\approx 2 \text{ \%}$ )  
(Darstellung 1,25 : 1)Abb. 10.3.4c Oberfläche der Rezeptur VI  
Farbmuster "Rot, # 110" ( $\approx 5 \text{ \%}$ )  
(Darstellung 1,25 : 1)Abb. 10.3.4d Oberfläche der Rezeptur VI  
Farbmuster "Rot, # 110" ( $\approx 8 \text{ \%}$ )  
(Darstellung 1,25 : 1)

Rezepturen  
 Betonage 4  
 (03.07.2003)  
 Mischung 1  
 Strukturschalung  
 'Welle'/Reckli #2/94

Mischung 1 (Ausgangs-Rezeptur $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ )	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/24,7 l	kg/24,7 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,132	3,10	410	41	10,14	10,14	410	40
(Nadel-)Holz "Fichte" <sup>o</sup>	0,375	0,40	150	15	3,71	3,71	150	15
Wasser	0,445	1,00	445	44	11,00	11,52	466	45
<b>Summe</b>	<b>0,95</b>			<b>100</b>				<b>100</b>

Abb. 10.4.1a Zusammensetzung der Mischung 1 (MPA Bau/TU München; 03.07.2003)

\* Portlandzement (CEM I 32,5 R)

<sup>o</sup> Holzfeuchtegehalt 7,53 %

Abb. 10.4.1b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
 Mischung 1 (MPA Bau/TUM; 03.07.2003)

Mischung 1 (Ausgangs-Rezeptur $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ )	
Konsistenz (11,00 l Wasser) [cm]	34,00
Konsistenz (11,52 l Wasser) [cm]	43,00
Luftporengehalt [%]	23
W/Z-Wert	1,14
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1307
Wasseranteil (x/445) [%]	105

Abb. 10.4.1c Oberfläche der Mischung 1  
 'Welle'/Reckli #2/94 (Verkleinerung,  
 Platte 60 x 60 cm)



Mischung 2 (Rezeptur III "40% GR 41" $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ )	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/21,6 l	kg/21,6 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,132	3,10	410	38	8,86	8,86	410	28
(Nadel-)Holz "Fichte" <sup>o</sup>	0,375	0,40	150	14	3,24	3,24	150	10
Wasser (75% von 445 kg/m <sup>3</sup> )	0,334	1,00	334	31	7,21	15,21	704	48
Granulat GR 41 (1–3 mm)	0,159	1,20	191	18	4,12	4,12	191	13
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>				<b>100</b>

Abb. 10.4.2a Zusammensetzung der Mischung 2 (MPA Bau/TU München; 03.07.2003)

- \* Portlandzement (CEM I 32,5 R)
- o Holzfeuchtegehalt 7,53 %

Abb. 10.4.2b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der Mischung 2 (MPA Bau/TUM; 03.07.2003)

- \* Bis zu den Festteilen
- \*\* einschließlich der Wasserränder

Mischung 2 (Rezeptur III "40% GR 41" $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ )	
Konsistenz (15,21 l Wasser) [cm]*	45,00
Konsistenz (15,21 l Wasser) [cm]**	49,00
Luftporengehalt [%]	
W/Z-Wert	1,72
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	
Wasseranteil (x/334) [%]	211
Wasseranteil (x/445) [%]	158

Abb. 10.4.2c Oberfläche der Mischung 2  
 Absorber (Verkleinerung,  
 Platte 60 x 60 cm)



Rezepturen  
 Betonage 4  
 (03.07.2003)  
 Mischung 3  
 Strukturschalung  
 'Rippe'/Reckli #1/34

Mischung 3 (Rezeptur VI "5% GR 41" $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ )	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/21,6 l	kg/21,6 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,194	3,10	600	47	12,96	12,96	600	35
(Nadel-)Holz "Fichte" <sup>o</sup>	0,321	0,40	128	10	2,77	2,77	128	7
Wasser (75% von 280 kg/m <sup>3</sup> )	0,210	1,00	210	17	4,54	14,06	651	38
Granulat GR 54 (0,2–0,6 mm)	0,276	1,20	331	26	7,15	7,15	331	19
Farbpigment $\approx 5 \%$ <sup>#</sup>					1,08	1,08		
<b>Summe</b>	<b>1,00</b>			<b>100</b>				<b>100</b>

Abb. 10.4.3a Zusammensetzung der Mischung 3 (MPA Bau/TU München; 03.07.2003); \* Portlandzement (CEM I 32,5 R)  
<sup>o</sup> Holzfeuchtegehalt 7,53 %; <sup>#</sup> Multiplikator Flüssigfarbe ("Rot, # 110") = 1,67 (bezogen auf den Zement-Masseanteil)

Abb. 10.4.3b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften der  
 Mischung 3 (MPA Bau/TUM; 03.07.2003)

Mischung 3 (Rezeptur VI "5% GR 41" $\rho \approx 1250 \text{ kg/m}^3$ )	
Konsistenz (14,06 l Wasser) [cm]	44,00
Luftporengehalt [%]	
W/Z-Wert	1,08
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	
Wasseranteil (x/210) [%]	310
Wasseranteil (x/280) [%]	232

Abb. 10.4.3c Oberfläche der Mischung 3  
 'Rippe'/Reckli #1/34 (Verkleinerung,  
 Platte 60 x 60 cm)



Mischung 1 (FM) (Ausgangs-Rezeptur $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ )	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/24,7 l	kg/24,7 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,132	3,10	410	41	10,14	10,14	410	41
(Nadel-)Holz "Fichte" <sup>o</sup>	0,375	0,40	150	15	3,71	3,71	150	15
Wasser	0,445	1,00	445	44	11,00	11,00	445	44
Fließmittel (1 %)					0,101			
Fließmittel (2 %)					0,203			
Fließmittel (3 %)					0,304			
<b>Summe</b>	<b>0,95</b>			<b>100</b>				

Abb. 10.5.1a Zusammensetzung der Mischung 1 (FM) (MPA Bau/TU München; 16.07.2003)

\* Portlandzement (CEM I 32,5 R); <sup>o</sup> Holzfeuchtegehalt 7,53 % (vgl. Betonage 4; wurde nicht mehr erneut ermittelt)Abb. 10.5.1b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften  
der Mischung 1 (FM) (MPA Bau/TUM;  
03.07.2003)

Mischung 1 (FM) (Ausgangs- Rezeptur $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ )	
Konsistenz (11,00 l W./1% FM) [cm]	31,00
Konsistenz (11,00 l W./3% FM) [cm]	–
Luftporengehalt [%]	
W/Z-Wert	1,09
Frischbeton $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ] (1% FM)	900
Wasseranteil (x/445) [%]	100

Rezepturen  
 Betonage 5  
 (16.07.2003)  
 Mischung 2  
 Fließmittel (FM)  
 Strukturschalung  
 'Welle'/Reckli #2/94

Mischung 2 (FM) (Ausgangs-Rezeptur $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ )	Stoffraum	Korn- rohdichte	Gewicht Zuschlag trocken berechnet	Granulat- Anteil / Ges.-Masse berechnet	Betonage berechnet	Betonage	Gewicht Zuschlag trocken	Granulat- Anteil / Ges.-Masse
Zuschlagsstoffe	m <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%	kg/24,7 l	kg/24,7 l	kg/m <sup>3</sup>	%
Portlandzement CEM I*	0,132	3,10	410	41	10,14	10,14	410	39
(Nadel-)Holz "Fichte" <sup>o</sup>	0,375	0,40	150	15	3,71	3,71	150	14
Wasser	0,445	1,00	445	44	11,00	12,00	485	46
Fließmittel (1 %)					0,101			
<b>Summe</b>	<b>0,95</b>			<b>100</b>				

Abb. 10.5.2a Zusammensetzung der Mischung 2 (FM) (MPA Bau/TU München; 16.07.2003)

\* Portlandzement (CEM I 32,5 R); ° Holzfeuchtegehalt 7,53 % (vgl. Betonage 4; wurde nicht mehr erneut ermittelt)

Abb. 10.5.2b Ermittlung von Frischbetoneigenschaften  
 der Mischung 2 (FM) (MPA Bau/TUM;  
 03.07.2003)

\* Frischbeton 'geschockt'  
 ° Frischbeton eingerüttelt

Mischung 2 (FM) (Ausgangs-Rezeptur $\rho \approx 600 \text{ kg/m}^3$ )	
Konsistenz (11,00 l W./1% FM) [cm]	32,00
Konsistenz (12,00 l W./1% FM) [cm]	46,00
Luftporengehalt [%]	30
W/Z-Wert	1,18
Frischbeton* $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ] (1% FM)	784
Frischbeton° $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ] (1% FM)	982
Wasseranteil (x/445) [%]	109

Abb. 10.5.2c Oberfläche der Mischung 2 (FM)  
 (Darstellung 1:1)



Prüfkörper	Gewicht	Höhe	Länge	Breite	Rohdichte $\rho$	Bruchlast F	Druckfestig- keit $\beta_w$
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]
V/1	2023	149	150	148	0,61	41,60	1,87
V/2	2106	150	150	148	0,63	44,33	2,00
Kleinsten Einzelwert					0,61		1,87
<b>Mittelwert:</b>					<b>0,62</b>		<b>1,94</b>

Abb. 10.5d Mischung 2 (FM); Druckfestigkeit am Prüfwürfel; Herstelltag: 16.07.2003, Prüftag: 13.08.2003, Prüfer: Hribar

Rezepturen  
 Betonage 5  
 (16.07.2003)  
 MPA Kennwerte  
 Mischung 2  
 Fließmittel (FM)  
 Strukturschalung  
 'Welle'/Reckli #2/94