

Warmbeton

Mischungsentwicklung mit verbesserter Übertragbarkeit in den Realmaßstab

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Agnes Elisabeth Schließer

aus Wiesbaden

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel
Tag der mündlichen Prüfung: 29.03.2019

Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart

2019

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart. Die Kenntnisse der Betontechnologie, die ich im Rahmen der vielseitigen Projektarbeit am IWB erwerben konnte, bilden die Grundlage dieser Dissertation. Mein Dank gilt Herrn Professor Harald Garrecht für die Möglichkeit zur Promotion in seiner Abteilung. Herrn Professor Karl-Christian Thienel von der Universität der Bundeswehr München danke ich für die Übernahme des Mitberichts und die konstruktiven Ratschläge zum Gelingen dieser Arbeit.

Mein Interesse an der Betontechnologie und an der experimentellen Arbeit im Labor wurde schon früh im Studium durch Herrn Dr. Christian Baumert geweckt. Ihm danke ich für die zahlreichen Gespräche und die praktische Unterstützung im Labor, die mir den Abschluss der Arbeit ermöglicht haben.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben auch meine studentischen Hilfskräfte Pinar Budur, Robert Hemmeter und Alexander Bauer beigetragen, die mich durch das umfangreiche Versuchsprogramm begleitet haben. Durch ihren zuverlässigen Einsatz wurden die unzähligen, oft gemeinsam im Labor verbrachten Stunden zu Tagen, an die ich mich gerne erinnere.

Wenn es unerwartete Hürden zu überwinden galt oder Geduld und Fleiß bei der Ausarbeitung gefragt waren, erwies sich das kontinuierliche Interesse von Kollegen und Freunden als große Hilfe. Insbesondere möchte ich Julian Pfänder, Helen Hein, Dr. Matthias Deuschle und Dr. Christina Kallendorf danken.

Von meinen Eltern und Brüdern habe ich den nötigen Rückhalt und das Vertrauen erfahren, um Neuem mit Interesse zu begegnen und mir auch langfristige Ziele zu setzen. Dafür bin ich sehr dankbar.

Stuttgart, im Juli 2019

Agnes Schließer

Kurzfassung

Warmbeton vereint tragende und wärmedämmende Eigenschaften in einem Baustoff. Damit ist die monolithische Ausführung von Außenwänden und der Verzicht auf eine zusätzliche Wärmedämmschicht möglich. Die Entwicklung und Verbesserung solcher Baustoffe wird von der Klimaschutzpolitischen Forderung nach einem annähernd klimaneutralen Gebäudebestand in Deutschland gefördert.

Die Energieeinsparverordnung (EnEV), die seit dem Inkrafttreten 2002 regelmäßig erneuert wurde, begrenzt unter anderem die zulässigen Transmissionswärmeverluste von einzelnen Bauteilen und Gebäuden. Als Bewertungsgrundlage für Wohngebäude gilt ein entsprechendes Referenzgebäude. Im Rahmen dieser Arbeit wird über die Betonentwicklung ausschließlich die Baustoffseite betrachtet. Aus dem entwickelten Warmbeton hergestellte Bauteile der Gebäudehülle sollen den U-Wert des Referenzgebäudes einhalten. Zudem wurde eine ausreichende Betonfestigkeit für den konstruktiven Einsatz angestrebt und erreicht. Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons erlaubt die Ausbildung von 50 cm dicken monolithischen Wänden bei einer Unterschreitung des Referenz-U-Werts um 14 %.

Mit einer Rohdichte von 480 kg/m^3 und einer Druckfestigkeit von $5,1 \text{ N/mm}^2$ ist der vorgestellte Warmbeton sowohl mit haufwerksporigem Leichtbeton als auch mit Porenbeton der Festigkeitsklasse 4 vergleichbar. Die Wärmeleitfähigkeit steigt beim Einstellen der Ausgleichsfeuchte mit der Umgebung jedoch weniger stark an als die von Porenbeton.

Findet die Entwicklung neuer Betone ausschließlich im Labor statt, sind unter den dort herrschenden optimalen Bedingungen sehr gute Betoneigenschaften einstellbar. Für eine erfolgreiche Übertragung in den Realmaßstab ist bereits von Beginn der Mischungsentwicklung an auf ein robustes Frischbetonverhalten zu achten, das über die Betrachtung der Packungsdichte abzuschätzen ist. Wird ebenfalls frühzeitig der von Mischerbautyp und -größe abhängige Energieeintrag in die Mischung beachtet, ist die Übertragung vom Labor- auf den Produktionsmischer bei nahezu gleichbleibender Betongüte möglich.

Die Frisch- und Festbetonkennwerte des Warmbetons wurden über einen Verarbeitungszeitraum von 3 Stunden ermittelt. Mit der Anpassung der Zusammensetzung an den Realmaßstab war sowohl eine gleichbleibend gute Verarbeitbarkeit als auch

das Einhalten der im Labormaßstab ermittelten Druckfestigkeit möglich. Auch der nach der Übertragung auf die Suspensionsmischanlage ermittelte Messwert der Wärmeleitfähigkeit von $0,118 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ist ausreichend niedrig, um den Anforderungen der EnEV zu genügen. Um einen Vergleich zwischen unter Normbedingungen an getrockneten Probekörpern durchgeführten Messungen der Wärmeleitfähigkeit und einseitigen Messungen an Wänden zu ermöglichen, wurde in Bezugnahme auf den Feuchtegehalt ein materialspezifischer Korrekturfaktor ermittelt. Damit ist bei der Anwendung des Warmbetons das Überprüfen der Wärmeleitfähigkeit an Gebäuden möglich.

Abstract

Ultra-lightweight concrete combines load-bearing and heat-insulating properties in one material. This enables a monolithic exterior wall design without the need for additional thermal insulation. The demand of German climate policy for the building stock to become nearly climate-neutral supports the development and improvement of such building materials.

The Energy Saving Ordinance (EnEV), which has been renewed regularly since its entry into force in 2002, limits among other things the permissible transmission heat losses of structural elements and building envelopes. The valuation basis for residential buildings is a corresponding reference building. Within the scope of this work, only the building material is considered. Thus, the U-value of the reference building is a target value which is to be kept. In addition, a sufficient concrete strength for constructive use was needed and achieved. The low thermal conductivity of the ultra-lightweight concrete allows monolithic walls with a size of 50 cm to be designed with an U-value 14 % below the reference U-value.

Having a bulk density of 480 kg/m^3 and a compressive strength of $5,1 \text{ N/mm}^2$, the ultra-lightweight concrete is comparable to Lightweight Aggregate Concrete (LAC) with open structure as well as to autoclaved aerated concrete of strength class 4. However, the thermal conductivity of ultra-lightweight concrete increases less in the state of equilibrium moisture content with the surroundings than that of autoclaved aerated concrete.

If the mix development of new concretes takes place only in the laboratory, very good concrete properties can be set under the optimal conditions prevailing there. To transfer this concrete properties to the construction site successfully, it is important to ensure a robust behavior of the fresh concrete right from the beginning of the mix design. This is possible by considering the packing density. Furthermore, observing the energy input into the concrete during the mixing process, which depends on mixer type and size, enables the process to be transferred from the laboratory mixer to the production mixer with almost constant quality of fresh and hardened concrete.

The properties of the ultra-lightweight concrete were determined over a processing period of 3 hours. After adapting the mixture proportion to the production mixer, the workability as well as the compressive strength were achieved consistent to those produ-

ced in the laboratory. Also, the thermal conductivity of $0,118 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ determined on concrete produced in the slurry mixer is sufficiently low to meet the requirements of the Energy Saving Ordinance. In order to enable a comparison of thermal conductivity measurements made on dried test specimens under standard conditions and on-site measurements on walls, a material-specific correction factor which takes moisture content into effect was determined. It is thus possible to verify the thermal conductivity of buildings when using the ultra-lightweight concrete.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	v
Abstract	vii
Formelzeichen und Abkürzungen	xvii
1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung	3
1.1.1. Zielsetzung	4
1.1.2. Vorgehensweise	5
1.2. Aufbau der Arbeit	5
2. Mischungsentwicklung und Betoneigenschaften	7
2.1. Packungsdichte	7
2.1.1. Mischungsentwicklung mit dem modifizierten Andreasen-Modell	8
2.1.2. Mischungsentwicklung mit dem Compressible Packing Model . .	9
2.2. Mischen von Beton	11
2.2.1. Entwicklung eines geeigneten Mischregimes	11
2.3. Betonverdichtung	14
2.4. Hydratation und Hydratationswärmeentwicklung	15
2.5. Formänderungen von Beton	16
2.6. Porengefüge im Beton	18
2.7. Feuchtesorption von Beton	20
2.8. Wärmeleitfähigkeit von Beton	21
2.9. Dauerhaftigkeit von Beton	23
2.9.1. Carbonatisierung	23
2.9.2. Frost-Tau-Widerstand	23
2.9.3. Wasseraufnahme	23
2.10. Porenbeton	24
2.11. Nachhaltigkeit von Baustoffen und Gebäuden	25

3. Entwicklungsansätze und Bauprojekte	27
3.1. Eigenschaften von Leichtbeton	27
3.1.1. Wärmeleitfähigkeit und thermische Behaglichkeit	28
3.1.2. Schallschutz	30
3.1.3. Zusammensetzung und Herstellung	31
3.2. Haufwerksporiger Leichtbeton	40
3.2.1. Mechanische Eigenschaften von haufwerksporigem Leichtbeton .	41
3.2.2. Abgrenzung gegenüber gefügedichtem Leichtbeton	42
3.3. Monolithisch bauen mit Beton	43
3.4. Vom Leichtbeton zum Infraleichtbeton	44
3.4.1. Schwindverhalten	47
3.4.2. Verbundverhalten	47
3.4.3. Thermische Eigenschaften	49
3.5. Infraleichtbeton im Wohnbau	50
3.5.1. Schwind- und Kriechverhalten	51
3.5.2. Verbundverhalten	51
3.6. Maßstabseinfluss auf die Betoneigenschaften	51
4. Ausgangsstoffe und Untersuchungsmethoden	55
4.1. Voraussetzungen für die Übertragbarkeit in den Realmaßstab	56
4.2. Kennwertermittlung	56
4.2.1. Ermittlung des Erstarrungsverhaltens	56
4.2.2. Messen von Druckfestigkeit, E-Modul und Verbundverhalten . .	58
4.2.3. Messen der Schwind- und Kriechverzerrungen	59
4.2.4. Messen der Porengrößenverteilung	61
4.2.5. Messen der Sorptionsisotherme	63
4.2.6. Messen der Wärmeleitfähigkeit	64
4.2.7. Bewertung der Dauerhaftigkeit	67
4.2.8. Ökobilanzierung	68
4.3. Ausgangsstoffe	69
4.3.1. Wahl der Ausgangsstoffe	69
4.3.2. Analyse der Ausgangsstoffe	70
4.3.3. Materialeigenschaften	70
4.3.4. Besonderheiten bei der Mischungsentwicklung von Holzleichtbeton	75
5. Betonentwicklung	77
5.1. Erste Entwicklungsschritte im Labormaßstab	77
5.1.1. Zusammensetzung der Gesteinskörnung	77
5.1.2. Zusammensetzung des Bindemittels	78

5.1.3.	Zusatzmittel	80
5.1.4.	Identifizierung einer geeigneten Zusammensetzung für die Weiterentwicklung	81
5.1.5.	Herstellung im Intensivmischer	83
5.1.6.	Zweistufige Herstellung im Suspensions- und Einwellenmischer	84
5.2.	Anpassung auf die Suspensionsmischanlage	85
5.3.	Anpassen der Verdichtung	86
6.	Eigenschaften des entwickelten Warmbetons	89
6.1.	Frischbetoneigenschaften	90
6.2.	Erstarrungsverhalten	92
6.2.1.	Einfluss der Umgebungstemperatur	93
6.3.	Festbetoneigenschaften	94
6.3.1.	Druckfestigkeit und E-Modul	94
6.3.2.	Verbundspannung	97
6.3.3.	Schwindverhalten	97
6.3.4.	Kriechverzerrungen	100
6.3.5.	Porengrößenverteilung	102
6.3.6.	Feuchtesorption	108
6.3.7.	Wärmeleitfähigkeit	109
6.4.	Dauerhaftigkeit	115
6.4.1.	Carbonatisierungsverhalten	115
6.4.2.	Beständigkeit gegenüber Abwitterung	115
6.4.3.	Wasseraufnahme	119
7.	Bewertung der Betoneigenschaften	123
7.1.	Vergleich mit Infralichtbetonen	123
7.1.1.	Frischbetoneigenschaften	123
7.1.2.	Erstarrungsverhalten	124
7.1.3.	Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und E-Modul	125
7.1.4.	Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit	127
7.1.5.	Verbund	132
7.1.6.	Schwindverhalten	132
7.1.7.	Kriechverhalten	135
7.1.8.	Porengrößenverteilung	136
7.1.9.	Sorptionsverhalten	136
7.1.10.	Dauerhaftigkeit	137
7.1.11.	Übertragbarkeit in den Realmaßstab	138

7.2. Vergleich mit Holzleichtbeton	140
7.2.1. Verwendung organischer Leichtzuschläge	141
7.2.2. Festbetoneigenschaften von Holzleichtbeton	141
7.2.3. Dauerhaftigkeit von Holzleichtbeton	144
7.2.4. Ökobilanzierung	145
7.3. Vergleich mit Porenbeton	147
7.3.1. Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit	147
7.3.2. Kriechverhalten	148
8. Zusammenfassung und Ausblick	149
A. Anhang	153
A.1. Betonzusammensetzungen	153
A.2. Messwerte der Druckfestigkeit	157
Literaturverzeichnis	158

Abbildungsverzeichnis

1.1. Wohnhaus mit monolithischem Wandaufbau aus Leichtbeton	2
2.1. Modifiziertes Andreasen-Modell	9
2.2. Betrachtung des Volumenanteils einer Korngrößenfraktion zur Berechnung der Packungsdichte	11
2.3. Labor- und Produktionsmischer	14
2.4. Wärmeflussmessung zur Hydratationsbeschreibung	15
3.1. Mineralschaum auf Tensid- und Proteinbasis	36
3.2. Verbundmodell für Infraleichtbeton nach Hückler	48
4.1. Optische Porengrößenauswertung	63
4.2. THB-Sensor	65
4.3. Partikelgrößenverteilung der betrachteten Gesteinskörnung	71
4.4. Partikelgrößenverteilung des betrachteten Bindemittels	72
4.5. Hydratationswärmeentwicklung der Zusatzstoffe	74
5.1. Sieblinien- und packungsdichteoptimierte Zusammensetzung der Gesteinskörnung	78
5.2. Porosierter Zementstein des Warmbetons	81
5.3. Schüttlagen infolge mangelhafter Verdichtung	87
6.1. Zeitliche Entwicklung der Konsistenz	91
6.2. Einfluss der Gesteinskörnung auf die Hydratationswärmeentwicklung	92
6.3. Einfluss der Umgebungstemperatur auf den Hydratationsverlauf	93
6.4. Einfluss des Feuchtegehalts auf den E-Modul	96
6.5. Verlauf von Verbundspannung und Schlupf in Ausziehversuchen	97
6.6. Schwindmessung	98
6.7. Quellen der Probekörper infolge Wärmebehandlung	99
6.8. Einfluss der Feuchtewechsellagerung auf die Längenänderung von Leim- und Mörtelprismen	100
6.9. Kriechverzerrung	102
6.10. Ermittlung des Endkriechmaßes nach Ross	102

6.11. Porengrößenverteilung mittels Quecksilberdruckporosimetrie	103
6.12. Summenkurven der Porengrößenverteilung	105
6.13. Luftporengehalt und Luftporen des Zementsteins in Abhängigkeit des Verarbeitungszeitpunkts nach Mischbeginn	106
6.14. Luftporengehalt und Luftporen von Beton und Blähglas	106
6.15. Aus den Kontrastbildern ermittelte Porengrößenverteilung von Zement- stein, Blähglas und Beton	107
6.16. Instabile Luftporen bei Verwendung von Proteinschaumbildner	108
6.17. Sorptionsisotherme des Warmbetons	109
6.18. Zusammenhang von Wärmeleitfähigkeit und Dichte	111
6.19. Einfluss der Messmethode auf die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit . .	113
6.20. Einfluss der Materialfeuchte auf die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit .	113
6.21. Carbonatisierungsfortschritt	116
6.22. Abwitterung infolge Frost-Tau-Beanspruchung	117
6.23. Betonoberfläche vor und nach 56 Frost-Tau-Wechseln	117
6.24. Entwicklung des E-Moduls unter zyklischer Feuchtebeaufschlagung . . .	118
6.25. Streuung der Messwerte bei der Ermittlung des E-Moduls	118
6.26. E-Modul und Dichte der bei 10 °C hergestellten Probekörper	118
6.27. E-Modul und Dichte der bei 20 °C hergestellten Probekörper	118
6.28. E-Modul und Dichte des Warmbetons	119
6.29. Wasseraufnahmekoeffizient während der Betonentwicklung	120
6.30. Wasseraufnahmekoeffizient des Warmbetons	120
7.1. Vergleich der rechnerisch und im Versuch ermittelten E-Moduln	126
7.2. Quotient der rechnerisch und im Versuch ermittelten E-Moduln in Ab- hängigkeit der Festigkeit	126
7.3. Quotient der rechnerisch und im Versuch ermittelten E-Moduln in Ab- hängigkeit der Rohdichte	126
7.4. Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit, Rohdichte und E-Modul . . .	127
7.5. Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte im Vergleich	129
7.6. Jahresverlauf der relativen Luftfeuchte in Stuttgart 2016	135
7.7. Einfluss der Kontaktzone auf das Bruchbild von Leichtbeton	143

Tabellenverzeichnis

2.1. Einteilung der Poren nach Größe	19
2.2. Größenordnung der in Beton vorkommenden Poren	19
3.1. Materialeigenschaften von Beton, Wärmedämmmaterial und Stahl im Vergleich	49
3.2. Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Infralichtbeton	53
4.1. Übersicht der durchgeführten Versuche	57
4.2. Relative Luftfeuchte zur Bestimmung der Sorptionsisotherme	63
4.3. Dichte und Packungsdichte der betrachteten Gesteinskörnung	71
4.4. Dichte und Packungsdichte des betrachteten Bindemittels	72
4.5. Wasseraufnahme von Blähglas und Holzspänen	73
5.1. Packungsdichte bei sieblinien- und packungsdichteoptimierte Zusammensetzung der Gesteinskörnung	78
5.2. Trockenrohichte, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit der ersten Mischungszusammensetzungen	79
5.3. Trockenrohichte, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Warmbetone im Labormaßstab	82
5.4. Eigenschaften der verwendeten Betonmischer	84
6.1. Zusammensetzung des Warmbetons bei der Herstellung im Labormischer	90
6.2. Zusammensetzung des Warmbetons bei der Herstellung in der Suspensionsmischanlage	90
6.3. Luftporengehalt und Konsistenz in Abhängigkeit der Verarbeitungsdauer	91
6.4. Festbetoneigenschaften des entwickelten Warmbetons	94
6.5. Maßstabseinfluss auf die Druckfestigkeit des Warmbetons	95
6.6. Charakteristische Festigkeit	96
6.7. Einfluss der Luftfeuchte auf das Schwindmaß	99
6.8. Elastische Anfangsstauchung im Kriechversuch	101
6.9. Spezifisches Kriechmaß	101
6.10. Endkriechmaß nach Ross und Kriechzahl	102
6.11. Porosität und Porengrößen	104

6.12. Maximale Massenzunahme der Matrix infolge Wasserdampfsorption . . .	109
6.13. Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Verarbeitungsdauer	110
6.14. Maßstabseinfluss auf Wärmeleitfähigkeit und Trockenrohddichte	111
6.15. Wärmeleitfähigkeit des porierten Zementsteins in Abhängigkeit der Verarbeitungsdauer	111
6.16. Thermische Kenngrößen von Warmbeton und Porenbeton	112
6.17. Korrekturfaktor für die einseitige Messung der Wärmeleitfähigkeit . . .	114
6.18. Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons bei der Herstellung im Realmaßstab	114
6.19. Abwitterung S_n infolge Frost-Tau-Beanspruchung	117
6.20. Wasseraufnahmekoeffizient W_W nach 24 Stunden	120
7.1. Erstarrungsdauer des Warmbetons in Abhängigkeit der Temperatur . .	124
7.2. Mess- und Rechenwerte des E-Moduls	127
7.3. Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit des entwickelten Warmbetons im Vergleich	128
7.4. Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit vom porierten Zementstein des Warmbetons und des Aerogelinfrleichtbetons	129
7.5. Verbundspannung von Warmbeton und Glasfaserbewehrung	132
7.6. Verbundspannung von Warmbeton und Bewehrungsstahl	132
7.7. Rohddichte und Wasseraufnahme mineralisierter Holzspäne	141
7.8. Festbetoneigenschaften von Warmbeton und Holzleichtbeton	142
7.9. Biegezug- und Druckfestigkeit des Holzleichtbetons	144
7.10. Carbonatisierungsverhalten von Holzbeton	145
7.11. Ökobilanz von Warmbeton	146
7.12. Ökobilanz von Holzleichtbeton	146
7.13. Festbetoneigenschaften von Warmbeton und Porenbeton	148
7.14. Kriechverhalten von Warmbeton und Porenbeton	148
A.1. Zusammensetzung von Warmbeton E	153
A.2. Betonzusammensetzungen zu Beginn der Mischungsentwicklung	154
A.3. Betonzusammensetzungen aus der Weiterentwicklung der ersten Mi- schungsentwürfe	155
A.4. Zusammensetzung des entwickelten Warmbetons (Warmbeton D2) bei der Herstellung in der Suspensionsmischanlage bei nachlassendem Luft- porengehalt	156
A.5. Messwerte der Druckfestigkeit	157

Formelzeichen und Abkürzungen

Griechische Buchstaben

α	[mm ² /s]	Thermische Diffusivität
Δr	[m]	Scherspalt
Δv	[m/s]	Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Mischbehälter und -werkzeug
ε	[J/(K · m ² · s ^{0,5})]	Thermische Effusivität
$\varepsilon_{k,t}$	[mm/m]	Kriechmaß zum Zeitpunkt t
<i>spez</i> $\varepsilon_{k,t}$	[(mm/m) / (N/mm ²)]	Spezifisches Kriechmaß zum Zeitpunkt t
$\varepsilon_{s,t}$	[µm/m]	Schwindmaß zum Zeitpunkt t
$\varphi(t, t_0)$	[–]	Kriechzahl nach Model Code 2010
Φ_1	[–]	Realer Volumenanteil einer Korngrößenfraktion zur Berechnung der Packungsdichte
Φ_1^*	[–]	Maximal möglicher Volumenanteil einer Korngrößenfraktion zur Berechnung der Packungsdichte
γ	[–]	Virtuelle Packungsdichte
$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	Schergradient
η_2	[–]	Beiwert zur Abschätzung des E-Moduls nach DIN EN 1520
η_E	[–]	Beiwert zur Abschätzung des E-Moduls nach EC 2
λ	[W/(m · K)]	Messwert der Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{tr,10}$	[W/(m · K)]	Bei 10 °C an der getrockneten Probe gemessene Wärmeleitfähigkeit
λ_D	[W/(m · K)]	Nennwert der Wärmeleitfähigkeit
λ_B	[W/(m · K)]	Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit
μ	[Pa · s]	Plastische Viskosität
ρ	[kg/m ³]	Rohdichte
ρ_{Sch}	[kg/m ³]	Schüttdichte
σ_{Hg}	[N/m]	Oberflächenspannung von Quecksilber
τ	[Pa]	Scherspannung
τ_0	[Pa]	Fließgrenze
Θ	[°]	Benetzungswinkel zwischen Quecksilber und Feststoff

Lateinische Buchstaben

c	[–]	Packungsdichte von Feinstoffen
c_p	[J/(kg · K)]	Spezifische Wärmekapazität
D	[mm]	Partikelgröße
D_{\max}	[mm]	Größtkorn
D_{\min}	[mm]	Kleinstkorn
E_{cm}	[N/mm ²]	Mittelwert des Elastizitätsmoduls
E_{lcm}	[N/mm ²]	Mittelwert des Elastizitätsmoduls von Leichtbeton
f_{ck}	[N/mm ²]	Charakteristische Druckfestigkeit
$f_{\text{ck,g}}$	[N/mm ²]	Deklarierte charakteristische Druckfestigkeit
f_k	[N/mm ²]	Charakteristische Festigkeit
f_{cm}	[N/mm ²]	Mittelwert der Druckfestigkeit
f_{min}	[N/mm ²]	Geforderte Mindestfestigkeit
$f_{\text{m,n}}$	[N/mm ²]	Mittelwert der Festigkeit
F_m	[–]	Feuchteumrechnungsfaktor zur Ermittlung des Bemessungswerts der Wärmeleitfähigkeit
Fr	[–]	Froude-Zahl
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
g^*	[–]	Packungsdichte der Gesteinskörnung
K	[–]	Verdichtungsindex
K_n	[–]	Statistischer Beiwert zur Bestimmung der charakteristischen Festigkeit
k_2	[–]	Koeffizient für ein einseitiges Toleranzintervall zur Ermittlung des Nennwerts der Wärmeleitfähigkeit
k_ρ	[–]	Dichtebezogener Korrekturfaktor für die abgewitterte Masse infolge Frost-Tau-Beanspruchung
k_w	[–]	Korrekturfaktor für die einseitige Messung der Wärmeleitfähigkeit mittels THB-Verfahren
n	[s ⁻¹]	Drehzahl
p	[N/mm ²]	Messdruck zur Ermittlung der Porengrößenverteilung mittels Quecksilberdruckporosimetrie
q	[–]	Verteilungsmodul
r_p	[nm]	Porenradius
S	[kJ/(m ³ · K)]	Wärmespeicherzahl
S_n	[kg/m ²]	Masse des abgewitterten Materials bezogen auf die Prüffläche
s_n	[–]	Standardabweichung
S_V	[m ² /m ³]	Volumenbezogene spezifische Oberfläche
U	[W/(m ² · K)]	Wärmedurchgangskoeffizient
W_w	[kg/(m ² · h ^{0,5})]	Wasseraufnahmekoeffizient

Abkürzungen

AFm	Tricalcium-Aluminat-Ferrit-Monosulfathydrat (Monosulfat)
AFt	Tricalcium-Aluminat-Ferrit-Trisulfathydrat (Ettringit)
AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
AP	Versauerungspotential
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CPM	Compressible Packing Model
CSH	Calciumsilikathydrat
C ₃ S	Tricalciumsilikat
C ₂ S	Dicalciumsilikat
C ₃ A	Tricalciumaluminat
DEF	Treibende Ettringitbildung (delayed ettringite formation)
DVS	Dynamische Wasserdampfsorption
EnEV	Energieeinsparverordnung
EP	Eutrophierungspotential
EPS	Expandiertes Polystyrol
fE	funktionelle Einheit einer Ökobilanz
GWP	Treibhauspotential
ILC	Infra-lightweight concrete (Infraleichtbeton)
LAC	Lightweight Aggregate Concrete (haufwerksporiger Leichtbeton)
LP	Luftporen
ODP	Stratosphärisches Ozonabbaupotential
PCE	Polycarboxylatether
PEe	Erneuerbare Primärenergie
PEne	Nicht erneuerbare Primärenergie
r.F.	Relative Luftfeuchte
THB	Transient-Hot-Bridge (Heizbrücke)
THS	Transient-Hot-Strip (Heizstreifen)
UHPC	Ultra High Performance Concrete (Ultrahochleistungsbeton)

1. Einleitung

Im Zuge des Klimaschutzpolitischen Ziels der Bundesregierung, bis 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand in Deutschland zu schaffen, rückt neben der Energieeffizienz von Gebäuden die Nachhaltigkeit von Baustoffen verstärkt in den Fokus der Wahrnehmung [1]. Während mit einer klassischen Wandkonstruktion aus Beton oder Mauerwerk mit außenliegender Wärmedämmung zwar eine Reduzierung des im Gebäude anfallenden Energieverbrauchs möglich ist, sind Trennung und Entsorgung klassischer Wärmedämmmaterialien wie EPS jedoch schwierig. Nach alternativen und nachhaltigen Wärmedämmmaterialien wird ebenso gesucht wie nach Möglichkeiten, auf diese zu verzichten. Warmbetone zeichnen sich durch eine niedrige Wärmeleitfähigkeit aus und kombinieren damit tragende und wärmedämmende Eigenschaften. Dadurch ist mit der Ausbildung monolithischer Außenwände der Verzicht auf eine zusätzliche Wärmedämmung möglich. Die niedrige Wärmeleitfähigkeit leichter Betone ist eine Folge der im Vergleich mit Normalbeton erhöhten Porosität. Neben den positiven Effekten der geringeren Wärmeleitfähigkeit und des geringeren Gewichts ist damit ebenfalls ein Festigkeitsabfall verbunden. Während die Weiterentwicklung hin zu leichteren Leichtbetonen bei entweder gleichbleibender Festigkeit oder reduzierter Wärmeleitfähigkeit überwiegend an Forschungseinrichtungen stattfindet, wurden wie 2001 in Fläsch (Schweiz) [2] auch Wohngebäude mit monolithischem Wandaufbau aus Leichtbeton errichtet (vgl. Abbildung 1.1). Der damals verwendete Leichtbeton genügt jedoch den aktuellen Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) [3] für Neubauten nicht mehr.

In der aktuellen Fassung der EnEV, die seit Januar 2016 gültig ist, wird für das Referenzgebäude als Bewertungsgrundlage ein zulässiger U-Wert von $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ vorgegeben. Da die Energieeffizienz von Gebäuden nicht durch die Wärmedämmung einzelner Bauteile bestimmt wird, ist eine Einhaltung der EnEV auch bei einer Überschreitung dieser einzelnen Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle möglich. Soll der Referenz-U-Wert von monolithischen Bauteilen aus Warmbeton eingehalten werden, resultiert daraus bei der Ausbildung von 50 cm dicken Wänden eine zulässige Wärmeleitfähigkeit von maximal $0,147 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

Der Begriff Warmbeton wird für Leichtbetone mit geringer Dichte verwendet, da diese aufgrund ihrer niedrigen thermischen Effusivität berührungswarm sind [4]. Diese



Abbildung 1.1.: Haus Meuli mit monolithischem Wandaufbau aus Leichtbeton [2]

Betone mit einer Trockenrohdichte $< 800 \text{ kg/m}^3$ werden in Abgrenzung zu Leichtbeton auch Infraleichtbeton genannt [5]. Mit sinkender Betondichte geht eine Reduzierung von Wärmeleitfähigkeit und Festigkeit einher [6], weshalb solche sehr leichten Leichtbetone ebenfalls als Dämmbeton bezeichnet werden [7]. Nach [8] ist ein gutes Verhältnis von Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit charakteristisch für Infraleichtbetone. Abhängig von der Betonrohdichte wird über die damit erreichbare Festigkeit die mögliche Gebäudehöhe abgeschätzt. So ist einem Infraleichtbeton mit einer Dichte von 600 kg/m^3 der Bau von zweigeschossigen Gebäuden möglich, während die mit einer höheren Dichte von 750 kg/m^3 einhergehende höhere Festigkeit die Ausbildung von sieben Geschossen ermöglicht.

Mit der Entwicklung eines Warmbetons mit sehr niedriger Wärmeleitfähigkeit wird am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart an die Entwicklung von Holzleichtbetonen angeknüpft. Beiden Betonen sind gute thermische Eigenschaften gemein. Das von Klatt entwickelte Verfahren zur Mineralisierung von Holzspänen ermöglicht die Verwendung von organischen Leichtzuschlägen ohne die typischen Nebenwirkungen wie Hydratationsinhibition [9]. Die gefügedichten Holzleichtbetone sind mit Rohdichten zwischen 1600 kg/m^3 und 1750 kg/m^3 und Druckfestigkeiten über 24 N/mm^2 konstruktiv einsetzbar, erfordern jedoch im Gegensatz zu Warmbeton eine zusätzliche Wärmedämmung. Zudem ist die Wasseraufnahme der Holzspäne neben der Qualität der aufgetragenen Umhüllung vom Holzalter abhängig, woraus im Realmaßstab ein hoher Aufwand zur Gewährleistung von Frischbetonstabilität und Verarbeitbarkeit resultiert. Um die Anwendbarkeit der durchgeführten Entwicklungen anhand der Übertragung vom Labor- in den Realmaßstab zu betrachten, lag der Schwerpunkt der Weiterentwicklung am IWB deshalb in den letzten Jahren auf einer rein mineralischen Zusammensetzung.

1.1. Problemstellung

Bei Betrachtung der in Kapitel 3 zusammengefassten Entwicklungsansätze von Infraleichtbetonen ist auffällig, dass für im Labor durchgeführte Betonentwicklungen niedrigere Wärmeleitfähigkeiten in Kombination mit höheren Druckfestigkeiten dokumentiert sind als für Gebäude aus Infraleichtbeton. Dieser im Folgenden als Maßstabseinfluss bezeichnete Unterschied der Betoneigenschaften zwischen im Labormischer und im Produktionsmischer hergestellten Probekörpern wird im Rahmen dieser Arbeit anhand der durchgeführten Betonentwicklung untersucht.

Wird im Labor mit geringen Mengen gearbeitet, ist eine hohe Genauigkeit bei Vorbereitung und Herstellung von Probekörpern möglich. Zudem reduziert das Einbringen des Betons in Probekörperschalungen unmittelbar nach Mischende den Einfluss der Konsistenzänderung mit steigender Verarbeitungsdauer. Für die Anwendung als Ortbeton ist das Betrachten einer ausreichend langen Verarbeitbarkeitsdauer bereits im Rahmen der Betonentwicklung unabdingbar.

So werden beispielsweise niedrigere Messwerte für die Wärmeleitfähigkeit als die in dieser Arbeit erzielten von $\lambda_{tr,10} = 0,109 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bei gleichzeitig höherer Druckfestigkeit nur für Infraleichtgeopolymere in [10] erzielt, mit zementgebundenen Systemen aber bisher nicht erreicht. Die Verarbeitbarkeit des Infraleichtgeopolymers lässt innerhalb von 60 Minuten nach Mischende sichtbar nach, was bereits darauf hindeutet, dass Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit bei der Verwendung als Ortbeton im Realmaßstab aufgrund der verlängerten Verarbeitungsdauer nicht reproduzierbar sind.

Da die Mischgüte von Frischbeton auch von Mischerbautyp und -größe abhängig ist, ist für eine erfolgreiche Übertragung der Betonzusammensetzung in den Realmaßstab bereits während der ersten Entwicklungsschritte im Labor die später in der Produktion zum Einsatz kommende Mischweise zu berücksichtigen.

Auch Umwelteinflüsse wie Temperaturschwankungen werden in klimatisierten Laborräumen vernachlässigt. Da hohe Temperaturen die Hydratation beschleunigen, ist einem in der Folge auftretenden schnelleren Ansteifen falls erforderlich über ein Anpassen der Zusammensetzung zu begegnen. Bei Leichtbeton und insbesondere bei verhältnismäßig dicken monolithischen Wänden aus Infraleichtbeton liegt der Temperaturanstieg infolge der Hydratationswärmeentwicklung im Bauteilinneren deutlich über dem an kleinen Probekörpern messbaren.

Eine weitere Besonderheit von Infraleichtbeton, die bei Messungen an Gebäuden zu einer höheren Wärmeleitfähigkeit führt als bei Messungen an im Labor hergestellten Probekörpern, ist der hohe Luftporengehalt. Dieser ermöglicht zwar eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit, die Luftporen sind im Frischbeton allerdings nicht vollständig

volumenstabil. Das Einstellen der Frischbetonstabilität über eine ausreichend lange Verarbeitbarkeitsdauer und eine geeignete Verdichtung der Bauteile beeinflusst die Herstellung sehr leichter Betone maßgeblich.

Im Rahmen dieser Arbeit wird unter Berücksichtigung der Einflüsse aus

- der Feststoffzusammensetzung,
- Mischerbautyp und -größe,
- Verarbeitbarkeitsdauer,
- Umgebungstemperatur,
- Hydratationswärmeentwicklung und
- mit der Zeit nachlassender Volumenstabilität der Luftporen im Frischbeton

ein Warmbeton entwickelt, der sich neben einer sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit bei der Übertragung in den Realmaßstab durch einen sehr kleinen Maßstabseinfluss auszeichnet.

1.1.1. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Warmbetons, der sich für den Bau monolithischer Wände in Sichtbeton eignet und den Anforderungen der Energieeinsparverordnung an den Wärmeschutz genügt. Bei einer Wandstärke von 50 cm wird hierfür die Einhaltung einer Wärmeleitfähigkeit von $\leq 0,147 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ angestrebt. Ist eine weitere Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit umsetzbar, ist mit der Ausbildung geringerer Wandstärken ein ressourcenfreundlicheres Bauen möglich. Entsprechend liegt der Fokus während der Betonentwicklung auf einer maximalen Absenkung der Wärmeleitfähigkeit.

Gleichzeitig ist auf die Einhaltung einer ausreichenden Betonfestigkeit für den Bau von zweigeschossigen Wohngebäuden zu achten. Zementgebundene Schäume nach [11], die aufgrund ihres hohen Luftgehalts und damit einhergehenden geringen Rohdichten zwischen $160 \text{ kg}/\text{m}^3$ und $200 \text{ kg}/\text{m}^3$ und Wärmeleitfähigkeiten $\leq 0,06 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ als Wärmedämmschicht einsetzbar sind, eignen sich mit ihren ebenfalls geringen Festigkeiten unter $0,4 \text{ N}/\text{mm}^2$ nicht für den Lastabtrag. Analog zu haufwerksporigem Leichtbeton, für den in DIN EN 1520 [12] für die Festigkeitsklasse LAC 2 die Einhaltung einer mittleren Druckfestigkeit von $\geq 4 \text{ N}/\text{mm}^2$ vorgeschrieben ist, wird im Rahmen der Betonentwicklung für den konstruktiven Einsatz eine Druckfestigkeit von mindestens $4 \text{ N}/\text{mm}^2$ des Warmbetons angestrebt.

In diesem Bereich ist neben vorgefertigten Elementen aus haufwerksporigem Leichtbeton Porenbeton etabliert, für den nach DIN 4108-4 [13] ein niedrigerer Bemessungswert

der Wärmeleitfähigkeit angesetzt werden kann als für einen Leichtbeton der gleichen Dichte. Mit der richtigen Zusammensetzung ist das Einhalten dieser Wärmeleitfähigkeit auch bei dem Betonieren von Warmbeton vor Ort möglich, wie mit der durchgeführten Betonentwicklung gezeigt wird.

1.1.2. Vorgehensweise

Im Gegensatz zu den in [5, 14] vorgestellten Wohnhäusern aus Warmbeton wird im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich Blähglas als leichte Gesteinskörnung verwendet. Mit der Wahl geeigneter Ausgangsstoffe beginnt die Mischungsentwicklung zunächst im Labormischer. Basis hierfür sind sieblinien- und packungsdichteoptimierte Feststoffzusammensetzungen (vgl. Abschnitt 2.1). Da im Labor kleine Mengen bei entsprechend kurzen Verarbeitungszeiten unter optimalen Bedingungen hergestellt werden, sind hierbei hohe Festigkeiten und niedrige Wärmeleitfähigkeiten einstellbar, die in der Baupraxis ohne Anpassungen der Zusammensetzung nicht erreichbar sind.

Entsprechende Bedeutung erhält die Betrachtung der Auswirkungen einer längeren Verarbeitungsdauer sowie eines bereits bei der Entwicklung im Labor auf den Produktionsmischer abgestimmten Mischregimes. Damit ist die Übertragbarkeit vom Labor- in den Realmaßstab bei nahezu gleichbleibender Betongüte möglich, wie Messungen von Luftporengehalt, Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit zeigen.

1.2. Aufbau der Arbeit

Der im Rahmen dieser Arbeit am IWB entwickelte Warmbeton mit einer Trockenroh-dichte von 480 kg/m^3 wurde in Hinblick auf die Wärmeleitfähigkeit optimiert und für die zweistufige Herstellung in einer Suspensionsmischanlage und Fahrmischern angepasst.

Als Grundlage hierfür wird in Kapitel 2 zunächst Literatur zur Mischungsentwicklung von Beton, zu Mischtechnik und den zu prüfenden Betoneigenschaften zusammengefasst. Kapitel 3 beschäftigt sich mit den Eigenschaften von Leichtbeton und stellt Entwicklungsansätze bis hin zum Warmbeton sowie Bauprojekte vor. Neben der Weiterentwicklung des Materials und damit einer Verbesserung der Festbetoneigenschaften fällt dabei jedoch auf, dass die Übertragbarkeit der im Labor entwickelten Betone in den Realmaßstab mit verringerten Festigkeiten und erhöhten Wärmeleitfähigkeiten einhergeht. Dieser Stand der Technik ermöglicht das konkrete Formulieren eines Zielwerts für die Wärmeleitfähigkeit sowie die vergleichende Bewertung des zu entwickelnden Warmbetons.

In Kapitel 4 werden neben den angewandten Untersuchungsmethoden zur Charakterisierung des Warmbetons die Eigenschaften der Ausgangsstoffe zusammengefasst und

in Kapitel 5 die ersten Entwicklungsschritte vorgestellt. Diese dienen zum Abschätzen der erreichbaren Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit, erst nach der Wahl einer geeigneten Zusammensetzung für die Übertragung in den Realmaßstab werden die weiteren in Abschnitt 4.2 vorgestellten Betoneigenschaften betrachtet. Kapitel 5 schließt mit der Übertragung der Zusammensetzung in den Realmaßstab. Hierfür wird eine zweistufige Herstellung zunächst einer Suspension in der Suspensionsmischanlage und deren Vermischung mit dem Blähglas in einfachen Mischern, sowie das Einstellen der Verdichtung für den sehr leichten Warmbeton betrachtet.

Der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Verarbeitbarkeit und das Erstarrungsverhalten (vgl. Abschnitt 6.2) sind ebenfalls wichtige Faktoren für die Übertragbarkeit in den Realmaßstab. Neben den hierzu durchgeführten Messungen wird in Kapitel 6 der Einfluss der betrachteten Verarbeitungsdauer auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften anhand der Versuchsergebnisse dargestellt. Während Wärmeleitfähigkeit, Druckfestigkeit und Porengrößenverteilung der Luftporen in Abhängigkeit von Herstellmenge und Verarbeitungsdauer aufgeführt sind, wurden weitere Festbetoneigenschaften wie Verbundverhalten, sowie Kriechen und Schwinden des Warmbetons erst nach der abgeschlossenen Betonentwicklung ermittelt. Mittels Versuchen zum Carbonatisierungsverhalten, zum Frost-Tau-Widerstand und zur hygrischen Formänderung wird die Dauerhaftigkeit des Betons und damit die Eignung für den Einsatz in Gebäuden abgesichert.

Zur Bewertung der Betoneigenschaften werden in Kapitel 7 neben den in Kapitel 3 vorgestellten Infralichtbetonen und haufwerksporigen Leichtbetonen zwei weitere Leichtbetone zum Vergleich herangezogen. Die Betoneigenschaften, die zu dem beobachteten Maßstabseffekt beitragen und damit für die Übertragung vom Labor- in den Realmaßstab von Bedeutung sind, werden in Abschnitt 7.1.11 zusammengefasst. Dichte, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit werden in ihrem Zusammenwirken mit einem ebenfalls am IWB entwickelten Holzleichtbeton verglichen. Die vergleichende Bewertung schließt mit einer Ökobilanzierung für eine 50 cm dicke, monolithische Wand aus Warmbeton, sowie für einen Wandaufbau mit gleichem U-Wert aus Holzleichtbeton mit zusätzlicher Wärmedämmung. Auch wenn sich der Bauablauf mit der Fertigung von Porenbetonsteinen im Werk und dem Betonieren vor Ort mit Warmbeton grundlegend unterscheidet, wird Porenbeton als Referenz für das Kriechverhalten herangezogen. Porenbeton ist im Bauwesen etabliert, die Festigkeitsklasse 4 weist eine mit dem entwickelten Warmbeton vergleichbare Dichte und Druckfestigkeit auf. Abschließend wird in Kapitel 8 das Potential von Warmbeton zusammengefasst.

2. Mischungsentwicklung und Betoneigenschaften

Mit dem modifizierten Andreasen-Modell und dem Compressible Packing Model (CPM) werden zwei Ansätze zur Mischungsentwicklung von Betonen mit hoher Packungsdichte vorgestellt. Auch Grundlegendes zum Mischen von Beton, zur Hydratation, dem Porengefüge im Beton, Wärmeleitfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton, sowie zur Ökobilanzierung wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.1. Packungsdichte

Betone mit hoher Packungsdichte zeichnen sich durch eine gute Fließfähigkeit, hohe Frischbetonstabilität sowie gute Festbetoneigenschaften aus [15]. Die zum Erreichen hoher Packungsdichten erforderliche gezielte Mischungszusammensetzung steigert zudem die Robustheit der Betone und ist folglich die Grundlage für die Übertragbarkeit der Mischungsentwicklung in den Realmaßstab.

Die Packungsdichte von Beton beschreibt das Verhältnis des Feststoffvolumens zum Gesamtvolumen [16] und ist eine Kenngröße für die Betongüte. Eine Steigerung des Feststoffvolumens wirkt sich positiv auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften aus [15]. Werden Hohlräume zwischen den Feststoffen mit feineren Partikeln gefüllt, steigt die Packungsdichte der Mischung. Wird Wasser zugegeben, werden nach [17] zunächst die verbleibenden Hohlräume gefüllt, bevor sich das überschüssige Wasser als Gleitfilm auf die Oberfläche der Partikel legt. Auch wenn Oberflächen, die mit dem Wasser in Kontakt kommen, benetzt werden bevor alle Hohlräume gefüllt sind, sinkt der Wasseranspruch der Mischung mit sinkendem Hohlraumgehalt. Dies geht auch in [18] aus einem Vergleich der rechnerischen Porosität mit dem experimentell bestimmten Wasserbedarf hervor. In der Folge wird der Frischbeton fließfähig, bleibt aufgrund der geringeren Wassermenge jedoch gleichzeitig stabil.

Das Einstellen der Verarbeitbarkeit über Zusatzstoffe zur Reduzierung des erforderlichen Wassergehalts ist bei Warmbetonen aufgrund der hohen Dichtedifferenz zwischen Zementleim und Gesteinskörnung von besonderer Bedeutung, um ein Aufschwimmen der leichten Gesteinskörnung zu verhindern. Neben der verbesserten Verarbeitbar-

keit zeichnen sich Betone mit dichtem Gefüge durch hohe Festigkeiten und eine gute Dauerhaftigkeit aus [16].

Die erreichbare Packungsdichte eines Betons wird von der Partikelform, der Partikelgrößenverteilung und dem Energieeintrag während des Mischvorgangs, des Einbaus und Verdichtens beeinflusst [16, 19]. Dabei erhöhen runde Partikel die Packungsdichte, der Einfluss der Kornform besteht ebenfalls im Mehlkornbereich [15]. Was die anderen beiden Einflussgrößen betrifft, wirkt sich eine weitgestufte Partikelgrößenverteilung ebenso wie ein hoher Energieeintrag positiv auf Packungsdichte und Betoneigenschaften aus [16].

Im Gegensatz zu rein sieblinienbasierten Modellen zur Optimierung der Packungsdichte werden im Compressible Packing Model nach [16] mit dem Wasser- und Fließmittelanpruch sowie des zur Verdichtung erforderlichen Energieeintrags weitere Kennwerte der Ausgangsstoffe berücksichtigt.

2.1.1. Mischungsentwicklung mit dem modifizierten Andreasen-Modell

Eine Sieblinienoptimierung stellt eine einfache Möglichkeit zur Mischungsentwicklung eines Betons mit guten Frisch- und Festbetoneigenschaften dar. Mit dem modifizierten Andreasen-Modell [20] wird eine Zielsieblinie berechnet, an die die Sieblinie des Betons zur Steigerung der Packungsdichte anzugleichen ist. Unter Berücksichtigung von Größt- und Kleinstkorn (D_{\max} und D_{\min}) wird der Siebdurchgang der Zielsieblinie $P(D)$ mit

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad [\text{Vol.} - \%]$$

berechnet. Die Zusammensetzung der Sieblinie wird vom Verteilungsmodul q beeinflusst, ein niedriger Verteilungsmodul führt, wie in Abbildung 2.1 ersichtlich wird, zu einem hohen Feinkorngehalt. Damit ist indirekt eine Berücksichtigung der Kornform möglich.

Für die Mischungsentwicklung von selbstverdichtendem Beton wird entsprechend ein niedriger Verteilungsmodul von $0,22 < q < 0,25$ empfohlen, für die Herstellung erdfeuchten Betons dagegen ein Verteilungsmodul von $0,35 < q < 0,40$ [21]. Mit der Wahl eines hohen Verteilungsmoduls sinkt der Wasseranspruch der Mischung, womit Grünstandfestigkeit und Druckfestigkeit steigen. Nach [22] wird die maximale Packungsdichte mit $q = 0,28$ erzielt, nach [23] ist der Verteilungsmodul in Abhängigkeit der Kornform zu wählen.

Hierfür wird der Kornindex, das Verhältnis von Länge zu Breite der Partikel, betrachtet. Mit steigendem Kornindex, also zunehmender Abweichung der Partikelform von der idealen Kugelform, wird ein geringerer Verteilungsmodul zur Berechnung der

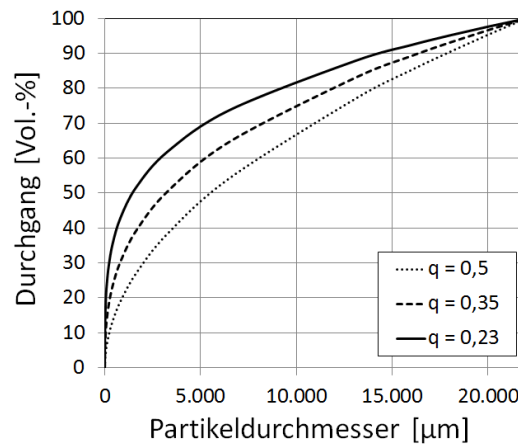


Abbildung 2.1.: Optimale Sieblinie nach dem modifizierten Andreasen-Modell in Abhängigkeit des Verteilungsmoduls q

Sieblinie mit maximaler Packungsdichte empfohlen. Mit dem in der Folge steigenden Feinkornanteil der Zielsieblinie wird berücksichtigt, dass sich die einzelnen Gesteinskörner in der Mischung weniger dicht anordnen und ein höheres Leimvolumen zum Füllen der Hohlräume benötigt wird. So steigt der als optimal berechnete Feinkornanteil bei dem in Abbildung 2.1 gezeigten Beispiel mit einem Größtkorn von 20 mm mit dem von $q = 0,5$ über $q = 0,35$ auf $q = 0,23$ sinkenden Verteilungsmodul bei einem Siebdurchgang von $409,6 \mu\text{m}$ von $13,4 \text{ Vol.} - \%$ auf $23,5 \text{ Vol.} - \%$ und $35,5 \text{ Vol.} - \%$.

2.1.2. Mischungsentwicklung mit dem Compressible Packing Model

In der am Laboratoire Central des Ponts et Chaussées entwickelten Software BétonlabPro [24] sind verschiedene Modelle zum Compressible Packing Model (CPM) verknüpft. Das CPM bildet den Zusammenhang zwischen einer Mischungszusammensetzung und den Betoneigenschaften ab, wodurch der iterative Entwicklungsprozess im Labor verkürzt wird. Die Software greift auf eine Datenbasis zu, in der die verwendeten Materialien mit ihren Eigenschaften vor der Nutzung zu hinterlegen sind. Damit sind beim Formulieren von Mischungszusammensetzungen Aussagen zu den Zielgrößen des CPMs wie Packungsdichte, Frischbetonstabilität, Fließfähigkeit und Betonfestigkeit möglich. Dadurch wird eine erste Anpassung des Mischungsentwurfes bereits auf dem Papier ermöglicht, auch wenn eine Überprüfung im Labor erforderlich ist [16, 25].

Für das Anlegen der Datenbasis werden die Ausgangsstoffe zunächst umfassend charakterisiert, um Informationen über die Partikelgrößenverteilung, den Wasser- und Fließmittelbedarf sowie im Fall von Bindemittel auch über die Festigkeitsentwicklung zu erhalten. Aus diesen im Versuch zu ermittelnden Kennwerten ist die Packungsdichte der einzelnen Ausgangsstoffe wie Gesteinskörnung, Zement und Zusatzstoffe zu berechnen.

Da die Packungsdichte dem Einfluss von Kornform und Rohdichte unterliegt, lässt sich die optimale Zusammensetzung mithilfe des CPMs unabhängig von der Sieblinie formulieren. Wird die Packungsdichte als Zielgröße gewählt, ist eine einzelne Korngrößenfraktion umso stärker in der idealen Mischung vorhanden, je höher die Packungsdichte dieser Fraktion ist [16].

Um die Packungsdichte von Mischungen verschiedener Ausgangsstoffe zu berechnen, betrachtet *BétonlabPro* zunächst die virtuelle Packungsdichte γ . Sie entspricht dem maximalen Feststoffvolumen, das bei einer gezielten Anordnung der einzelnen Partikel mithilfe eines maximalen Energieeintrags erreicht wird. Durch das Homogenisieren verschiedener Ausgangsstoffe im Mischer ist die virtuelle Packungsdichte nicht erreichbar. Zur Berechnung der virtuellen Packungsdichte einer Mischung verschiedener Ausgangsstoffe wird, wie in Abbildung 2.2 beispielhaft für die mittlere Korngrößenfraktion dargestellt, nacheinander jede Korngrößenfraktion bzw. im Feinkornbereich jeder Ausgangsstoff als dominierend angenommen. Die in der Mischung vorhandenen Hohlräume werden mit Partikeln dieser Fraktion aufgefüllt. Das infolge des gezielten Auffüllens der Hohlräume mit Partikeln der dominierenden Fraktion erhöhte Verhältnis vom Feststoff- zum Gesamtvolumen entspricht der virtuellen Packungsdichte der Mischung. Ist die virtuelle Packungsdichte jeweils durch das Einsetzen jeder Fraktion in die Hohlräume der Mischung berechnet, entspricht der niedrigste so bestimmte Wert der virtuellen Packungsdichte der gesamten Mischung [16].

Die reale Packungsdichte, bei der die Partikel beliebig angeordnet sind, ist zwangsläufig niedriger als die virtuelle Packungsdichte. Der Verdichtungsindex K , der vom Verhältnis des vorhandenen Volumens einer Fraktion Φ_i zum maximal möglichen Volumen dieser Fraktion Φ_i^* bei gleichbleibendem Volumen der anderen Fraktionen bestimmt wird, beschreibt den Energieeintrag in die Mischung. Mit steigendem Feststoffvolumen steigt ebenfalls der Energieeintrag, der erforderlich ist, um ein Annähern der Packungsdichte an die virtuelle Packungsdichte zu erreichen. Die Abweichung der realen von der virtuellen Packungsdichte lässt sich über das Festlegen des Verdichtungsindex berechnen. Sowohl für die Versuche zur Ermittlung der Packungsdichte der Gesteinskörnung als auch für die entsprechenden Versuche für Bindemittel wird von der Software ein Verdichtungsindex vorgeschlagen, der im Rahmen der Entwicklung des CPMs auf experimenteller Basis bestimmt wurde [16, 26].

Sind die gewählten Ausgangsstoffe bereits in der Datenbasis angelegt, ist das Formulieren einer packungsdichteoptimierten Mischungszusammensetzung mit den in Abschnitt 2.1 beschriebenen positiven Auswirkungen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften möglich. Hierfür werden wie in Abschnitt 5.1 im ersten Schritt der Mischungsentwicklung mit *BétonlabPro* die Anteile der einzelnen Gesteinskörnungsfraktionen für die Zusammensetzung mit maximaler Packungsdichte ermittelt. Dadurch

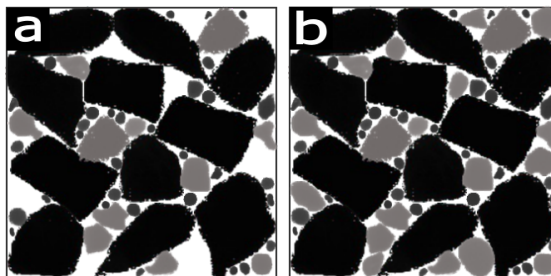


Abbildung 2.2.: Betrachtung a) des realen Volumenanteils Φ_i einer Korngrößenfraktion und b) des maximal möglichen Volumenanteils dieser Fraktion Φ_i^* zur Berechnung der Packungsdichte nach [16]

sinkt der für das Einstellen der gewünschten Frischbetonkonsistenz erforderliche Zementleimbedarf. Ein hohes Gesteinskörnungsvolumen wirkt Formänderungen des Festbetons entgegen [16]. Für das Auffüllen der Hohlräume zwischen den groben Partikeln wird anschließend die Zusammensetzung des Zementleims bestimmt. Wird auch hier die Zusammensetzung zu maximaler Packungsdichte gewählt, geht damit in der Regel eine erhöhte Fließfähigkeit und Druckfestigkeit einher. Im Gegensatz zur sieblinienbasierten Mischungsentwicklung werden hierbei neben der Zugabe von Wasser und Fließmittel auch die über LP-Bildner eingebrachten Luftporen in der Stoffraumrechnung berücksichtigt.

2.2. Mischen von Beton

Die Ausgangsstoffe werden in einem Mischer homogenisiert. Der für einen ausreichenden Aufschluss erforderliche Energieeintrag ist dabei von der Feststoffkonzentration des Mischguts abhängig, vgl. Abschnitt 2.1.2. Um eine Übertragbarkeit in den Realmaßstab zu ermöglichen, sollte die Mischungsentwicklung im Labor mit einem Mischertyp durchgeführt werden, der später in der Produktion zur Verfügung steht. Ist dies nicht möglich, schafft die im folgenden Abschnitt vorgestellte Betrachtung der Maschinen-Froude-Zahl eine Vergleichsbasis.

2.2.1. Entwicklung eines geeigneten Mischregimes

Neben der Zusammensetzung der Ausgangsstoffe beeinflusst auch der Mischvorgang die Konsistenz des Betons. Die optimale Mischgeschwindigkeit und -dauer ist dabei vom Bautyp und der Größe des verwendeten Mixers abhängig [27, 28].

Mischprozess und Mischgüte

Während des Mischvorgangs werden die Ausgangsstoffe homogenisiert. Dabei wird zwischen Makromischen infolge Konvektion und dem gleichzeitig stattfindendem Mikromischen infolge Dispersion unterschieden. Mit Konvektion wird die Vermengung der einzelnen Ausgangsstoffe bezeichnet, die durch die Bewegung des Mischwerkzeugs verursacht wird. Der Dispersionsvorgang beschreibt dagegen die Bewegung einzelner Partikel, die für das vollständige Auflösen von Agglomeraten erforderlich ist [27, 28, 29]. Nach [29] bedingt dispersives Mischen einen hohen Scherenergieeintrag, wohingegen ein Auseinanderbrechen der Agglomerate durch Scherkräfte nach [28] lediglich einen vernachlässigbaren Anteil am Mikromischvorgang bewirkt. Maßgebend ist demzufolge das Auflösen von Agglomeraten durch Kollision mit anderen Partikeln, insbesondere im Beisein grober Gesteinskörnung und bei hohen Mischgeschwindigkeiten. Aber auch durch Reibung der Partikel untereinander hervorgerufene Erosion trägt zum Mischvorgang bei. Mit kleiner werdendem Größtkorn steigt entsprechend die Bedeutung der Mischgeschwindigkeit.

Neben Mischgeschwindigkeit und -dauer bestimmt die Zugabereihenfolge der Ausgangsstoffe die zu erreichende Mischgüte. Für das Mischen von Ultrahochleistungsbeton (UHPC) mit einem hohen Feinstkorngehalt und kleinem Größtkorn wird in der Regel ein dreistufiges Mischregime empfohlen. Hierbei werden zunächst die Feststoffe gemischt, anschließend ein Teil des Wassers mit einem Teil des Fließmittels zugegeben und in der dritten Stufe mit dem restlichen Wasser und Fließmittel die Verflüssigung herbeigeführt [27, 30]. Auch zweistufige Mischprozesse, die zunächst den Aufschluss von Bindemittel mit Wasser und Zusatzmitteln bei hohen Mischgeschwindigkeiten vorgeben, bevor bei niedrigen Geschwindigkeiten die Gesteinskörnung zugegeben wird, gelten als wirkungsvoll. Die Umsetzung ist sowohl in einem einzelnen Mischer, in dem auch Teilmengen gut aufgeschlossen werden können [31], als auch über die Herstellung des Bindemittelleims in einem Suspensionsmischer und das anschließende Untermischen der Gesteinskörnung in einem weiteren Mischer möglich [27].

Wird hierfür wie bei der Herstellung eines Infraleichtbetons in [32] ein Fahrmischer verwendet, ist nach DIN EN 206, Tabelle 27, [33] das Dosieren von Suspension und Blähglas auf $\pm 3\%$ genau durchzuführen.

Der aus Mischgeschwindigkeit und -dauer resultierende Energieeintrag während des Mischvorgangs beeinflusst die Packungsdichte des Betons [16] und ist sowohl vom Mischerbautyp als auch von der Mischergröße abhängig [27, 28]. Die verwendeten Labor- und Produktionsmischer sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Eine Möglichkeit zur vergleichenden Beschreibung des Energieeintrags in die Mischung bietet die Froude-Zahl, die die aufgebrachte Zentrifugalkraft mit der Gewichtskraft ins Verhältnis setzt, wobei näherungsweise die Froude-Zahl des Mixers betrachtet wird. Mit dem Radius

des Mischwerkzeugs r , der Drehzahl n und der Erdbeschleunigung g lässt sich die Maschinen-Froude-Zahl Fr berechnen [29].

$$Fr = \frac{r \cdot n^2 \cdot 4 \cdot \pi^2}{g} \quad [-]$$

Bei Suspensionsmischern ist zusätzlich der Schergradient von Bedeutung, da die hohe Beanspruchung im Scherspalt die Deagglomeration der Feststoffe in der Suspension unterstützt. Der Schergradient $\dot{\gamma}$ wird von der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Mischbehälter und -werkzeug Δv und dem Scherspalt Δr bestimmt [27].

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta v}{\Delta r} \quad [\text{s}^{-1}]$$

Die bei den gewählten Mischwerkzeuggeschwindigkeiten auftretenden Froude-Zahlen und Schergradienten der für die Entwicklung des Warmbetons verwendeten Mischer sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

In einem Suspensionsmischer wird die Flüssigkeit vorgelegt und das Bindemittel sukzessive zugegeben. Die Suspension wird durch Zentrifugalkräfte an die Innenwandung des Mixers geführt und dort im Spalt zwischen Wandung und Mischwerkzeug einer hohen Scherbeanspruchung ausgesetzt [27]. Der Scherspalt des verwendeten Mixers SC-50-K von MAT ist ca. 3 mm breit, woraus bei der Nenndrehzahl des Motors ein Schergradient von 3300 s^{-1} resultiert. Die Perforierung der Blattrührer erzeugt bei ausreichender Werkzeuggeschwindigkeit ebenfalls eine hohe Scherbelastung. Die Deagglomeration von Partikelzusammenschlüssen wird durch die in der turbulenten Strömung auftretende Pseudokavitation unterstützt [31].

Bevor die vollständige Benetzung aller Partikel und damit eine Homogenisierung der Suspension durch den Mischprozess erreicht ist, ist in den Partikelagglomeraten Luft eingeschlossen. Bei einem lokalen Druckabfall in der Suspension unter den Sättigungsdruck expandieren die Luftblasen und fallen infolge des Transports in Bereiche der Suspension mit höherem Druck implusionsartig zusammen. Im Gegensatz zu den bei Kavitation auftretenden Dampfblasen wirken implodierende Luftblasen nicht schädigend, sondern verbessern den Aufschluss der Suspension [34, 35]. Der Schergradient der Suspensionsmischanlage Obermann OM 800 beträgt zwar aufgrund des 15 mm breiten Scherspalts nur ein Drittel des Schergradienten des Mixers SC-50-K und das Mischwerkzeug ist nicht perforiert, die rund 6-fach höhere Froude-Zahl garantiert jedoch ebenfalls eine hohe Mischintensität.

Bei der Herstellung des Warmbetons sind für das Vermischen von Suspension und Blähglas niedrige Mischgeschwindigkeiten z. B. in einem Einwellenmischer ausreichend. Eine niedrige Mischgeschwindigkeit führt in einem Einwellenmischer zu einer reinen



Abbildung 2.3.: a) Laborintensivmischer mit Stiftwirbler, b) Mischzelle des Suspensionsmischers SC-50-K mit perforiertem Blattrührer, c) Einwellenmischer, d) Suspensionsmischanlage OM 800 mit geöffneter Mischzelle

Schubbewegung des Mischguts. Bei höheren Wellendrehzahlen, die zu einer Froude-Zahl $Fr > 1$ führen, lösen sich Partikel aus der Masse. Die so erzeugte Schleuderbewegung beschleunigt die Homogenisierung und ermöglicht auch in Einwellenmischern das Mischen von Hochleistungsbetonen [31].

2.3. Betonverdichtung

Wird Frischbeton in Schalungen eingebracht, verbleibt Luft in Hohlräumen. Die Feststoffe und Luftporen befinden sich in einem Gleichgewichtszustand, der ein Entlüften und Verdichten der Feststoffe unter Eigengewicht verhindert. Das Fließverhalten von Frischbeton wird über die Fließgrenze τ_0 und die Viskosität μ mit dem Bingham-Modell beschrieben. Von außen aufgebraachte Scherspannung τ erzeugt im Frischbeton einen Schergradienten $\dot{\gamma}$.

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad [\text{Pa}]$$

Überwindet die von außen zugeführte Energie die Reibung zwischen den Feststoffen, wird das Füllen von Hohlräumen mit Feststoffen und ein Entweichen der eingeschlossenen Luft möglich [16, 36, 37].

Das Verdichten von Beton ist mit Innen- und Außenvibratoren möglich. Mit der Verwendung von Außenvibratoren wird eine hohe Oberflächenqualität erzielt, so dass diese bei Sichtbetonflächen häufig zum Einsatz kommen. Außenvibratoren leiten die Verdichtungsenergie zunächst in die Schalung und gelangen über die Schalhaut in den Frischbeton. Entsprechend beeinflussen Material und Geometrie der Schalung, aber auch der Frischbetondruck, die Dämpfung der eingeleiteten Vibrationen. Die Reichweite von Außenvibratoren beträgt ca. 50 cm in den Beton hinein, die Amplitude wird mit zunehmender Eindringtiefe geringer [38].

2.4. Hydratation und Hydratationswärmeentwicklung

Für die Verarbeitungsdauer von Beton ist der Erstarrungsbeginn ausschlaggebend. Er bezeichnet den Zeitpunkt, ab dem sich im Zementleim durch das Verzahnen der Hydratationsprodukte eine feste Struktur ausbildet [39]. Die erforderliche Verweildauer in der Schalung wird bei plastischen und weichen Betonen dagegen vom Erstarrungsende bestimmt. Das Messen der Hydratationswärme in einem Wärmeflusskalorimeter liefert zusätzliche Informationen zum Hydratationsverlauf, der von der Bindemittelzusammensetzung abhängt [40]. In Abbildung 2.4 ist beispielhaft eine Wärmeflussmessung abgebildet, in der mit den Punkten 1 bis 5 die Hydratationsphasen nach [41, 42, 43] eingezeichnet sind. Die Wärmeflussmessung von Beton liefert Erstarrungsbeginn und -ende mit einer guten Übereinstimmung zum Eindringversuch nach ASTM C 403. Der

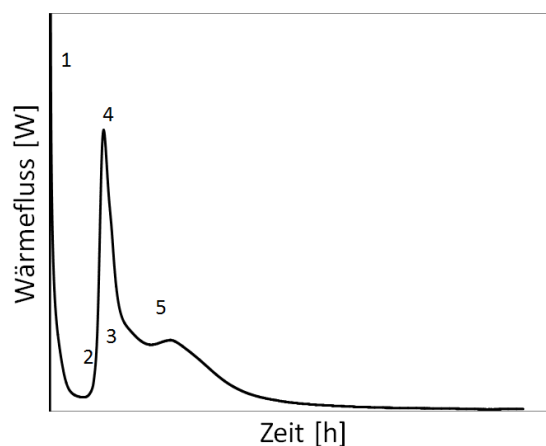


Abbildung 2.4.: Eine Wärmeflussmessung zeigt den zeitlichen Verlauf der Hydratation an: 1) Ruhephase, 2) Erstarrungsbeginn, 3) Silikatreaktion, 4) Erstarrungsende und 5) Aluminatreaktion, nach [41, 42]

Erstarrungsbeginn liegt danach zeitlich am Beginn des zweiten Hydratationspeaks und ist über das Maximum der ersten Ableitung der Messkurve ermittelbar (vgl. Abbildung 2.4 Punkt 2) [41]. Da das Maximum der Ableitung dem Wendepunkt der Messkurve entspricht, ist eine Darstellung der Ableitung nicht erforderlich. Das Erstarrungsende entspricht dem anschließenden Nulldurchgang der Ableitung [41], also dem zweiten Peak der Messkurve (vgl. Abbildung 2.4 Punkt 4). Mit dem Kontakt von Wasser und Bindemittel beginnen die Hydratationsreaktionen [43], so dass beim Einbringen des Materials in die Messzelle des Kalorimeters sofort ein hoher Wärmefluss aufgezeichnet wird, der mit dem Übergang in die Ruhephase sinkt (vgl. Abbildung 2.4 Punkt 1). In der nächsten Phase der Hydratation entsteht aus CSH-Phasen, Calciumhydroxid und Ettringit ein Gefüge im Beton. Diese Reaktionen sind mit einem Anstieg des Wärmeflusses verbunden, das entstandene Gefüge wird im Folgenden mit den weiteren Reaktionsprodukten verdichtet und erhärtet (vgl. Abbildung 2.4 Punkt 3). Die Wärmeentwicklung geht mit dem Abklingen der Silikatreaktion zurück und steigt mit einer erneuten Aluminatreaktion (vgl. Abbildung 2.4 Punkt 5) vor dem Abfallen infolge nachlassender Hydratation erneut an [42, 43]. Für den entwickelten Warmbeton wurde neben dem Anteil der Zusatzstoffe an der Hydratation der Temperatureinfluss auf die Erstarrungsdauer betrachtet.

2.5. Formänderungen von Beton

Mit Schwinden wird eine lastunabhängige Verformung von Beton bezeichnet, die durch einen Volumenverlust infolge chemischer Reaktionen wie der Zementhydratation oder Carbonatisierung sowie durch Austrocknung hervorgerufen wird. Treten Verformungen unter Last auf, wird von Kriechen gesprochen [44]. Die Größenordnung von Schwinden und Kriechen ist von der Betonzusammensetzung abhängig. Insbesondere Volumen und Steifigkeit der Gesteinskörnung beeinflussen die Formstabilität des Festbetons [16, 45]. Während ein hoher Zementgehalt die Verformungen vergrößert [45, 46, 47], wirkt ein hoher Anteil an Gesteinskörnung Formänderungen entgegen [16].

Chemisches Schwinden bezeichnet den Volumenverlust während der Hydratation. Die Ausgangsstoffe Zement und Wasser nehmen ein größeres Volumen ein als die Reaktionsprodukte [43, 46]. Autogenes Schwinden wird teilweise mit chemischem Schwinden gleichgesetzt, teilweise als Summe von chemischem und autogenem Schwinden betrachtet [48]. Hierbei wird das für die Hydratation erforderliche Wasser aus den größeren Poren in Mikroporen gezogen. Die dabei entstehende kapillare Zugspannung bewirkt eine Volumenverringerung und wird auch als Selbstaustrocknung bezeichnet [39]. Auf die Hydratation zurückgeführtes Schwinden ist irreversibel [48], ebenso wie das durch die erste Austrocknung des Zementsteins hervorgerufene Trocknungsschwinden, das

den größten Anteil am Gesamtschwinden ausmacht. Dabei bilden sich zwischen den Partikeln primär gebundene Kontaktstellen, die nicht wieder aufgebrochen werden [49]. Die Umgebungsfeuchte beeinflusst das Schwindmaß und führt bei guter Nachbehandlung und damit verzögerter Austrocknung des Betons zu einer Reduzierung der Schwindverformung [47]. Neben der relativen Luftfeuchte sind Temperatur und bei Laborversuchen die Probekörpergröße, im Realmaßstab die Bauteilabmessung, als Einflussfaktoren auf Schwinden und Kriechen bekannt [50].

Carbonatisierungsschwinden tritt infolge der Volumenabnahme während der Carbonatisierungsreaktion im Beton in der Regel nur in der Randzone auf, so dass eventuell entstehende Netzrisse lediglich oberflächennahe Beeinträchtigungen hervorrufen [43]. Zudem ist der Anteil des Carbonatisierungsschwindens an der gesamten Schwindverkürzung bei gefügedichtem Beton gering [46], bei Porenbeton jedoch ausgeprägt möglich, sofern ausreichend CO_2 für die Carbonatisierungsreaktion zur Verfügung steht [44, 51].

Sowohl Schwinden als auch Quellen sind teilweise von der Umgebungsfeuchte abhängig und reversibel. Diese reversiblen Volumenänderungen in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte sind auf zwei Vorgänge zurückzuführen. Im trockenen Zustand herrschen in den Feststoffpartikeln des Zementsteins Druckspannungen, die von der freien Oberflächenenergie verursacht werden. Mit steigender Luftfeuchte werden Wassermoleküle an der Oberfläche des Porenraums adsorbiert. Die Wassermoleküle reduzieren die Druckspannungen in den Feststoffpartikeln, woraus eine Ausdehnung der Partikel resultiert. Diese Ausdehnung der Partikel infolge sinkender Oberflächenenergie bewirkt eine maßstäbliche Gefügeausdehnung [49, 52]. Das reversible Schwinden und Quellen von Beton wird bei niedrigen relativen Luftfeuchten maßgeblich von der Änderung der freien Oberflächenenergie bestimmt. Bei hohen relativen Luftfeuchten über 40 % wird die weitere Gefügeausdehnung durch Spaltdruck verursacht [49]. Mit Spaltdruck wird der Druck bezeichnet, der durch adsorbiertes Wasser an Engstellen im Porengefüge hervorgerufen wird. Übersteigt die doppelte Dicke der adsorbierten Wasserschicht den Abstand zwischen zwei Partikeln, stehen die Wassermoleküle unter einem hohen Druck [49, 52]. Dieser Spaltdruck dehnt das Gefüge lokal an Kontaktstellen, deren Lösung möglich ist. Durch primäre Bindungskräfte zusammengehaltene Kontaktstellen zwischen Partikeln, die beim ersten Austrocknen des Zementsteins entstanden sind, werden jedoch auch bei hohen Umgebungsfeuchten nicht aufgebrochen [52].

Tritt bei hohen Umgebungsfeuchten Quellen auf, beeinflusst das auch das Materialverhalten unter Last. Die Kriechgeschwindigkeit nimmt proportional zur Gefügeausdehnung zu [49].

Von der Umgebungsfeuchte unabhängiges Quellen wird durch treibende Reaktionen verursacht, die das Gefüge und damit die mechanischen Eigenschaften des Betons schädigen. Eine mögliche Ursache ist die Bildung von Ettringit im bereits erstarr-

ten Gefüge. Tritt eine solche sekundäre Ettringitbildung ohne äußeren Sulfateintrag auf, wird diese als DEF (delayed ettringite formation) bezeichnet. DEF ist infolge einer Wärmebehandlung von Beton zur Erhärtungsbeschleunigung oder infolge Hydratationswärmeentwicklung bei Temperaturen über 70 °C möglich [53, 54, 55]. Hohe Temperaturen führen zu einer Lösung von Sulfaten im bereits erhärteten Beton. Die in der Folge zu erneut auftretende Ettringitbildung ist mit einer Volumenvergrößerung verbunden [54]. Die Gefahr einer treibenden Ettringitbildung wird im Wesentlichen von der Zusammensetzung des Bindemittels bestimmt [56], aber auch von der Mikrostruktur des Betons [53]. Wird ein Teil des Zements durch feine puzzolanische oder latent hydraulische Zusatzstoffe ersetzt, kann das Quellen reduziert oder verhindert werden [54, 55, 56].

2.6. Porengefüge im Beton

Beton enthält Poren mit Durchmessern von wenigen Nanometern bis hin zu einigen Millimetern. Die Porengrößen und der Porenanteil im Zementstein werden maßgeblich vom w/z -Wert, aber auch von der Bindemittelzusammensetzung beeinflusst. Während Beton mit zunehmendem Wassergehalt eine höhere Porosität aufweist, führt die Verwendung von Zusatzstoffen zu einem dichteren Gefüge und damit in der Regel auch zu kleineren Poren [47, 57, 58]. Die Umgebungsbedingungen während der Hydratation stellen einen weiteren Einflussfaktor auf die Porengrößenverteilung dar. Niedrige Temperaturen bewirken einen höheren Anteil an chemisch gebundenem Wasser, der zur Ausbildung dichter CSH-Phasen und einer geringeren Porosität führt [57, 59]. Damit deckt sich die in [60] beobachtete Verschiebung der Porengrößenverteilung hin zu feineren Poren bei niedrigen Temperaturen, die hier jedoch mit einer höheren Porosität einhergeht.

Sowohl die Porosität als auch die Porengrößenverteilung von Beton lässt sich im Bereich der Gel- und Kapillarporen mittels Quecksilberdruckporosimetrie bestimmen, während in der Größenordnung der Luftporen Aufnahmen mit einem Lichtmikroskop geeignet sind, um die Porosität zu ermitteln [47].

Die Poren im Beton werden entweder nach der Porengröße oder nach der Entstehungsart unterschieden [61]. Die in Tabelle 2.1 dargestellte Einteilung nach der Größe in Mikro-, Meso- und Makroporen bezieht sich auf Poren, die während der Zementhydratation zwischen den Reaktionsprodukten entstehen und ist bei der Ermittlung von Sorptionsisothermen gängig, da die aufgenommenen Wassermoleküle zunächst die Mikroporen füllen [61, 62].

Wird die Porenart betrachtet, sind Gelporen die kleinsten Poren, die in der Regel mit Porenlösung gefüllt sind [47]. Da das Wasser in den Gelporen nicht nur zwischen

Tabelle 2.1.: Einteilung der Poren nach Größe

	Durchmesser [nm]
Mikroporen	< 2
Mesoporen	2...50
Makroporen	> 50

den CSH-Phasen eingelagert, sondern teilweise in den AFm- und AFt-Phasen chemisch gebunden ist, ist der Begriff Gelporen irreführend, aber für die Beschreibung des Zementsteingefüges geläufig [58, 61]. Während das in den Hydraten chemisch gebundene Wasser nicht verdampfbar ist, ist ein Verdampfen des an den Wandungen der Gelporen physikalisch gebundenen Wassers bei 105 °C möglich [58]. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die Größenordnung der verschiedenen Porenarten. Setzer [43] unterscheidet nach Dauerhaftigkeitsaspekten in Mikro- und Mesogelporen. In den feinen Mikrogelporen gefriert Wasser erst bei ca. -90 °C, wohingegen in den Mesogelporen Wasser bei Temperaturen zwischen -20 °C und -39 °C gefriert. Romberg grenzt die Schrumpfporen mit Durchmessern zwischen 0,5 nm und 30 nm trotz vergleichbarer Porengröße von den Gelporen ab und bezeichnet damit die Poren, die durch Volumenabnahme der Ausgangsstoffe während der Hydratation entstehen [47].

Auch die Kapillarporen, die durch weder chemisch noch physikalisch gebundenes Überschusswasser entstehen und aufgrund ihrer Vernetzung für Transportvorgänge im Zementstein verantwortlich sind [47, 58], werden von Setzer in Mikro- und Mesokapillaren unterteilt, da erstere durch kapillares Saugen nicht vollständig befüllbar sind. Kapillar- und Luftporen sind für den Frost-Tau-Widerstand entscheidend, da Wasser in diesen Poren zwischen 0 °C und -20 °C gefriert [43] und nur die größeren, mittels LP-Bildner eingebrachten und kugelförmigen Luftporen, die die Kapillarwirkung unterbrechen, Platz für die damit verbundene Volumenzunahme des Wassers bieten. Die größten Poren, die Verdichtungsporen, entstehen durch

Tabelle 2.2.: Größenordnung der in Beton vorkommenden Poren

	Porengröße [μm] nach							
	[43]		[47]		[58]		[61]	
	d_{\min}	d_{\max}	d_{\min}	d_{\max}	d_{\min}	d_{\max}	d_{\min}	d_{\max}
Mikrogelporen		0,001	0,001	0,01		0,05	0,0005	0,003
Mesogelporen		0,3						
Schrumpfporen			0,005	0,03				
Mikrokapillarporen		1	0,01	100	0,01	100	0,01	5
Mesokapillarporen		30						
Luftporen		1000	1	1000			5	1000
Verdichtungsporen	1000		1000		1000	10000	1000	5000

Luft eintrag in den Beton während des Mischens und Einbaus und lassen sich in Abhängigkeit der Betonkonsistenz auch durch Verdichten nicht vollständig entfernen [47, 58, 61].

2.7. Feuchtesorption von Beton

Bei Adsorption und Desorption, dem Anlagern von Wassermolekülen auf der Oberfläche von Feststoffen und dem Ablösen von adsorbierten Molekülen, wird ein thermodynamisches Gleichgewicht angestrebt [63]. Die Aufnahme und die Abgabe von Wassermolekülen auf bzw. von der inneren Oberfläche von Beton ist von der Umgebungstemperatur, vom Verhältnis des Wasserdampfpartialdrucks zum Wasserdampf-sättigungsdruck im Porensystem und der relativen Luftfeuchte abhängig.

Zur Bestimmung der Sorptionsisotherme mittels dynamischer Wasserdampfsorption (DVS) werden nach DIN EN ISO 12571 [64] zuvor getrocknete Proben des Zementsteins bei konstanter Temperatur bis zur Massenkonstanz mit schrittweise steigender bzw. fallender relativer Luftfeuchte beaufschlagt [65, 66]. Dabei wird die Adsorption von Wasser im Porengefüge von Beton von der Polarität der Wassermoleküle, der heterogenen Zusammensetzung des Zementsteins und der Porenstruktur beeinflusst [67]. Nach [65] bestimmt die Vernetzung der Poren die Feuchtesorption stärker als das vorhandene Volumen der Poren.

Vereinfacht wird von einer homogenen Zusammensetzung der Porenoberflächen ausgegangen. Bei Beaufschlagung der getrockneten Proben mit zunächst niedriger relativer Luftfeuchte gelangen Wassermoleküle durch Diffusion in den Porenraum und werden an den Porenwänden adsorbiert [62, 66, 67, 68]. Wird die Bewegung der Wassermoleküle wie in den kleinen Mikroporen von Zusammenstößen mit der Porenwand bestimmt, spricht man von Effusion. Bei der Betrachtung von Beton mit einer breiten Porengrößenverteilung wird die Effusion meist mit der Diffusion zusammengefasst [69]. Die Adsorption von Wassermolekülen in trockenen Proben erfolgt unabhängig von der Porengröße [67, 69]. Nach der Absorption einer Monoschicht Wassermoleküle auf den Porenwänden bilden sich weitere Wassermolekülschichten aus. Dabei füllen sich, beginnend bei den kleinsten Poren, zunächst die Mikroporen vollständig [62, 66].

Bei hohen relativen Luftfeuchten tritt zusätzlich Kapillarkondensation auf [62, 67, 68]. Nach [66] beginnt dieser Effekt bei relativen Luftfeuchten über 60 %. Berühren sich die auf der Porenwand adsorbierten Wassermoleküle in der Porenmitte, bildet sich ein Meniskus aus. An der gekrümmten Oberfläche einer Flüssigkeit verändert sich der Dampfdruck, woraus eine erhöhte Flüssigkeitsaufnahme resultiert, die Kapillarkondensation. Da sich bei der Desorption der Krümmungsradius des Meniskus so ändert, dass ein höherer relativer Dampfdruck entsteht, unterscheiden sich die Ad- und Desorpti-

onsisotherme beim Auftreten von Kapillarkondensation [63]. Die Kapillarkondensation beginnt in den Engstellen des Porensystems [67, 69]. Die Mikroporen sind nach [62] jedoch bereits infolge von Adsorption ohne die Ausbildung eines Meniskus verfüllt, so dass die Kapillarkondensation folglich in den Mesoporen beginnend auftritt.

Die Kapillarkondensation wird in der Adsorptionskurve in der höheren Steigung infolge verstärkter Massenzunahme sichtbar. Eine hohe Massenabnahme im Bereich niedriger relativer Luftfeuchten wird nach [65] während der Desorption mutmaßlich durch den Flaschenhalseffekt hervorgerufen. Diese durch kleine Öffnungen in der Porenwandung oder die Aneinanderreihung von Mikro- und Mesoporen entstehenden Engstellen im Porensystem verzögern die Desorption, da das in dahinterliegenden größeren Poren adsorbierte Wasser nicht entweichen kann. In der Folge bildet die Sorptionsisotherme eine Hysterese [63, 67, 68]. Neben dem Flaschenhalseffekt führt [70] offenporige Systeme und die in Beton vorliegende heterogene Porenstruktur mit Mikro-, Meso- und Kapillarporen als geometrische Ursache für die Unterschiede zwischen Ad- und Desorptionsverhalten an. Aber auch die chemische Zusammensetzung des Porenraums und die Temperatur sind mögliche Ursachen für die Ausbildung einer Hysterese [70]. Die Sorptionsisothermen eines Materials nähern sich bei höheren Prüftemperaturen aneinander an, selbst das Zusammenfallen beider Isothermen ist möglich. Runde Poren mit schmalen Durchbrüchen führen dagegen zur Ausbildung weiter Hystereseschleifen [68].

Die Verwendung von Zusatzstoffen verändert das Porengefüge und damit auch die Feuchtesorption von Beton. In [66, 65] wird die gefügeverdichtende Wirkung von Hüttensandmehl betrachtet, die untersuchten Zementsteinproben enthalten keine eingebrachten Luftporen. Die ermittelten Sorptionsisothermen bilden mit einer Differenz von 2 M. – % bis 3,5 M. – % eine schmalere Hystereseschleife. Erst ein hoher Hüttensandgehalt von 60 % führt zur Ausbildung einer weiten Hystereseschleife mit einer Differenz von 4 M. – %. Während niedrigere Hüttensandgehalte mit steigendem Betonalter eine Annäherung der Sorptionsisothermen aneinander bewirken, weitet sich die Hystereseschleife bei hohen Hüttensandgehalten mit zunehmendem Betonalter. Die Verdichtung des Zementsteingefüges ist bei einem Hüttensandgehalt von 40 % am stärksten ausgeprägt. Das verringerte Porenvolumen im Mesoporenbereich wird in der schmaleren Hysterese sichtbar [65].

2.8. Wärmeleitfähigkeit von Beton

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist ein Maß für die Wärmeenergie, die bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin innerhalb von einer Stunde durch einen Stoff mit einer Fläche von 1 m^2 und einer Dicke von 1 m transportiert wird. Bei porenhaltigen Stoffen wie

Beton setzt sich die Wärmeleitfähigkeit neben den Anteilen des Feststoffes, also des Zementsteins sowie der Gesteinskörnung, und des Füllgases im Porenraum aus einem Konvektionsanteil und Strahlung innerhalb der Poren zusammen [71].

Umgebungseinflüsse wie Temperatur und Feuchtegehalt wirken sich ebenfalls auf die Wärmeleitfähigkeit von Bauteilen aus. Mit steigender Temperatur nimmt die Wärmeleitfähigkeit von amorphen Stoffen wie Glas linear zu [69]. Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser entspricht mit $0,5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ dem 25-fachen der Wärmeleitfähigkeit von Luft ($0,02 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) [72]. Entsprechend steigt die Wärmeleitfähigkeit von Beton bei einer Durchfeuchtung. Nach [73] steigt die Wärmeleitfähigkeit von Leichtbeton bei sonst gleichen Bedingungen mit zunehmendem Feuchtegehalt linear um $0,015 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bis $0,021 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ je $\text{M.} - \%$ aufgenommenen Wassers an. Nach [74] führt die Feuchteaufnahme von $1 \text{ M.} - \%$ bei Leichtbeton dagegen erfahrungsgemäß zu einer Zunahme der Wärmeleitfähigkeit um 4% . Die Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton wird mit einer Zunahme um 42% je $\text{M.} - \%$ Feuchte deutlich stärker von der Umgebung beeinflusst [75].

Die Wärmeleitfähigkeit wird im Wesentlichen von der Rohdichte beeinflusst, die niedrigsten Wärmeleitfähigkeiten liegen bei Stoffen mit einer Rohdichte zwischen $20 \text{ kg}/\text{m}^3$ und $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ vor. Niedrigere Rohdichten führen aufgrund eines höheren Konvektions- und Strahlungsanteils im Porenraum zu geringfügigen Erhöhungen der Wärmeleitfähigkeit. Bei höheren Rohdichten führt die Wärmeleitung des Feststoffanteils zu einem deutlichen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des Stoffes [74].

Die Wärmeleitfähigkeit zählt zu den wärme- und feuchteschutztechnischen Bemessungswerten, die für gängige Baustoffe normativ festgehalten sind, um den Wärmedurchgang von Bauteilen zu bestimmen. Nach DIN EN ISO 10456 [76] liegt der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für Normalbeton mit einer Rohdichte von $2000 \text{ kg}/\text{m}^3$ bei $1,35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, für armierten Beton mit 2% Stahl und einer Rohdichte von $2400 \text{ kg}/\text{m}^3$ bei $2,5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit für Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge und dampfgehärteten Porenbeton sind in DIN 4108-4 [13] gegeben. Für Leichtbeton mit einer Dichte von $800 \text{ kg}/\text{m}^3$ mit $0,39 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und bei einer Dichte von $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ mit $0,49 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Gefügedichte Betone mit geringeren Dichten sind nicht normativ geregelt, weshalb die Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton zum Vergleich herangezogen wird. Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton beträgt bei einer Dichte von $500 \text{ kg}/\text{m}^3$ $0,14 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, bei einer Dichte von $800 \text{ kg}/\text{m}^3$ $0,23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und bei einer Dichte von $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ $0,29 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Die Wärmeleitfähigkeit von Leichtbeton ist nach Norm also bei gleicher Dichte höher anzusetzen als die von Porenbeton. Mit der Entwicklung des Warmbetons wird eine Wärmeleitfähigkeit vergleichbar mit der von Porenbeton angestrebt.

2.9. Dauerhaftigkeit von Beton

Die Dauerhaftigkeit von Beton beschreibt die Beständigkeit von Betonbauteilen während der vorgesehenen Nutzungsdauer. Kennwerte, die mit der Dauerhaftigkeit von Beton in Verbindung gebracht und am Festbeton geprüft werden, sind die Wasseraufnahme, der Frost-Tau-Widerstand, die Carbonatisierungstiefe, sowie Dehnungen und Rissbildung infolge Einwirkung aggressiver Medien oder einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) [77]. Bei der Verwendung von Blähglas als leichte Gesteinskörnung wird vor der Möglichkeit einer AKR gewarnt [78, 79, 80]. Das entstehende Gel wird dabei nach [78] jedoch von den Poren des Blähglases aufgenommen, so dass die umliegende Matrix nicht geschädigt wird. In [79] wird bestätigt, dass die Reaktionsprodukte der Alkali-Silika-Reaktion in den Poren der leichten Gesteinskörnung verbleiben, deren Struktur aber teilweise zerstören, was negative Auswirkungen sowohl auf die mechanischen Eigenschaften als auch auf die Wärmeleitfähigkeit mit sich bringen kann. [80] beobachtete dagegen eine Dehnung der Mörtelprismen sowie einen Verlust der Druckfestigkeit bis zu 43 % infolge von AKR. Nach [81] sind bei der enthaltenen Zementmenge jedoch keine vorbeugenden Maßnahmen gegen eine schädigende Alkalireaktion im Beton zu ergreifen.

2.9.1. Carbonatisierung

Aus der Umgebung diffundiert CO_2 in den Beton und reagiert bei ausreichendem Feuchteangebot mit dem vorhandenen Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat. Durch das größere Volumen der Reaktionsprodukte wird das Porenvolumen reduziert und folglich sowohl die Gefügedichtheit als auch die Betonfestigkeit erhöht. Gleichzeitig sinkt der pH-Wert von über 13 auf ca. 9, was bei fortschreitender Carbonatisierung den Verlust des Korrosionsschutzes der Bewehrung durch die Passivierung der Stahloberfläche im alkalischen Milieu des Betons bedeutet [77].

2.9.2. Frost-Tau-Widerstand

Frost führt zu Abplatzungen, wenn der Porenraum im Beton mit Wasser gefüllt ist und freies Volumen fehlt, während sich das Wasser beim Gefrieren ausdehnt. Da Luftporen die Kapillaren unterbrechen, werden sie nicht vollständig mit Wasser gefüllt und verringern so die Gefahr von Abplatzungen [43, 44, 77].

2.9.3. Wasseraufnahme

Das Porengefüge von Beton beeinflusst die Wasseraufnahme. Bei einem Durchmesser der Poren zwischen $0,1 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$ findet kapillares Saugen statt, größere Poren

wie Luft- und Haufwerksporen unterbrechen die Kapillarwirkung und reduzieren damit die Wasseraufnahme [77]. Für einen ausreichenden Widerstand gegenüber starken Schlagregenereignissen ist nach DIN 4108-3 ein wasserabweisender Baustoff für Außenbauteile zu wählen. Da die Wände monolithisch ausgebildet werden, ist der Grenzwert des Wasseraufnahmekoeffizienten von $W_w \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ für die Einteilung als wasserabweisend bei der Mischungsentwicklung des Warmbetons zu berücksichtigen [82].

2.10. Porenbeton

Mit Rohdichten zwischen $300 \text{ kg}/\text{m}^3$ und $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ und Wärmeleitfähigkeiten zwischen $0,10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und $0,31 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [83] ist Porenbeton diesbezüglich mit Warmbeton vergleichbar. Beide Baustoffe verbinden Lastabtrag und Wärmedämmung in einem Material. Dadurch weisen sie nach [4] ein hohes Recyclingpotential auf. Ein weiterer Vorteil neben der von der Porenstruktur begünstigten schalldämmenden Wirkung ist der rein mineralische Wandquerschnitt mit der damit verbundenen Nichtbrennbarkeit. Die Druckfestigkeit von Porenbeton mit sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeiten liegt üblicherweise unter $5 \text{ N}/\text{mm}^2$. Mit dieser Festigkeit lassen sich Gebäude mit zwei Geschossen errichten. Höhere Festigkeiten, die für die Konstruktion von mehrgeschossigen Gebäuden erforderlich sind, gehen mit höheren Wärmeleitfähigkeiten einher. Zudem ist bei der Verwendung von Porenbeton die Wandfläche zum Schutz vor einem Feuchteintrag aus Bewitterung zu verputzen, was bei Warmbetonwänden nicht erforderlich ist.

Auch ohne direkte Berechnung beeinflusst der Feuchtegehalt von Porenbeton die Wärmeleitfähigkeit des Baustoffs. Die Ausgleichsfeuchte von Porenbeton liegt zwischen $3,5 \text{ M.} - \%$ und $5,0 \text{ M.} - \%$ [51]. Nach [75] bewirkt eine Feuchtezunahme von $1 \text{ M.} - \%$ eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um 42% . Entsprechend wird für die Messung der Wärmeleitfähigkeit von einer Trocknung der Porenbetonproben abgeraten [84].

Aufgrund der vergleichbaren Dichte und Druckfestigkeit wurde Porenbeton für einen Vergleich des Kriechverhaltens gewählt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich das vergleichsweise homogene Gefüge von Porenbeton auf den Lastabtrag und das Kriechvermögen auswirkt. Während Kriechen bei Normalbeton mit einer Lastumlagerung von hochbelasteten Bereichen auf weniger beanspruchte Bereiche im Gefüge einhergeht, ist das Kriechvermögen von Porenbeton aufgrund des homogeneren Material und dem damit verbundenen gleichmäßigen Kraftfluss deutlich geringer. Da kein Festigkeitszuwachs stattfindet, ist das Alter von Porenbeton bei Belastungsbeginn vernachlässigbar, wohingegen die bei Normalbeton mit zunehmendem Betonalter einhergehende Nacherhärtung zu einer Abnahme der Kriechgeschwindigkeit führt. Auch das Schwinden, das im Anschluss an die Autoklavierung von Porenbeton erfolgt, ist ausschließlich vom

Feuchtegehalt und damit von der Umgebungsfeuchte abhängig und nicht vom Probenalter. Hat sich in Porenbeton die Ausgleichsfeuchte eingestellt, führen Änderungen der relativen Luftfeuchte zu Quellen und Schwinden [51].

2.11. Nachhaltigkeit von Baustoffen und Gebäuden

Mit einer Ökobilanzierung ist die Bewertung von Baustoffen und Gebäuden hinsichtlich des klimaschutzpolitischen Ziels, einen annähernd klimaneutralen Gebäudebestand zu schaffen, und darüber hinaus möglich. Nach DIN EN ISO 14040 [85] wird im Rahmen einer Ökobilanz der gesamte Lebensweg eines Produktes unter ökologischen Aspekten betrachtet. Ökonomische und soziale Aspekte, die für nachhaltiges Bauen ebenfalls wichtig sind, sind gesondert zu berücksichtigen.

Für das Erstellen einer Ökobilanz wird zunächst eine funktionelle Einheit (fE) definiert. Diese wird hinsichtlich verschiedener emissions- und ressourcenbezogener Kategorien näher betrachtet. Dabei ist eine Bewertung bezüglich des Treibhauspotentials, des Ozonabbaupotentials, des Versauerungs- und Eutrophierungspotentials, sowie des Primärenergiebedarfs gebräuchlich.

Treibhauspotential (GWP)

Das Treibhauspotential beschreibt den Wärmestau in der Erdatmosphäre durch Sonneneinstrahlung. Die kurzwellige Strahlung durchdringt die Atmosphäre und erwärmt die Erdoberfläche. Die Treibhausgase der Atmosphäre sind für die langwellige Rückstrahlung der erwärmten Oberfläche nicht durchlässig und absorbieren die Wärmeenergie. So verbleibt die der Erde über Sonneneinstrahlung zugeführte Energie in der Atmosphäre. Die aufgenommene Energie wird über Absorption und Konvektion in alle Richtungen weitergeleitet und gelangt teilweise zurück zur Erdoberfläche, was zu einer weiteren Erwärmung führt. Durch Verbrennung fossiler Stoffe und Viehzucht steigt die Konzentration der Treibhausgase Kohlenstoffdioxid, Distickstoffoxid und Methan. Der daraus resultierende Anteil der Erderwärmung wird als anthropogener Treibhauseffekt bezeichnet. Zur Abschätzung des Treibhauspotentials werden die verschiedenen Treibhausgase unter Berücksichtigung der Verweilzeit in der Atmosphäre bezogen auf CO₂ ermittelt und verglichen [86, 87].

Ozonabbaupotential (ODP)

Das in der Stratosphäre und Troposphäre vorkommende Spurengas Ozon (O₃) absorbiert einen Großteil der UV-Strahlung der Sonne. Erhöhte Konzentrationen von UV-Strahlung sind für Mensch und Natur schädlich. Entsprechend wird der Fortschritt

des überwiegend von Fluorchlorkohlenwasserstoff (FCKW) verursachten Abbaus der Ozonschicht beobachtet. Zur Bewertung des ozonschädigenden Potentials wird der auf den FCKW Trichlorfluormethan bezogene R11-Äquivalenzwert bestimmt [86, 87].

Versauerungspotential (AP)

Durch Verbrennungsprozesse fossiler Brennstoffe werden in Industrie, Kraftwerken, Haushalten und Verkehr Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxide (NO_x) freigesetzt. Bei der Reaktion von SO_2 und NO_x mit Wasser entsteht Schwefel- und Salpetersäure. Damit ist eine Absenkung des pH-Werts von Niederschlag verbunden, der als sogenannter saurer Regen fällt. Saurer Regen wirkt negativ auf Gewässer, Böden, Gebäude und die menschliche Gesundheit. Das Versauerungspotential von Emissionen wird mithilfe des Schwefeldioxid-Äquivalents ($\text{SO}_2 - \text{Äq.}$) abgeschätzt [86].

Eutrophierungspotential (EP)

Übermäßige Nährstoffanreicherung in Gewässern und Böden wird als Eutrophierung bezeichnet. Sie führt in Gewässern zu verstärktem Algenwachstum, wodurch die Photosynthese und der Sauerstoffgehalt vermindert werden. Sinkt die Sauerstoffkonzentration zu stark, sterben Lebewesen und die Bildung von Schwefelwasserstoff und Methan führt zum Umkippen des Gewässers.

In Böden sind erhöhte Nitratkonzentrationen im Grundwasser die Folgen eines Überangebots von Nährstoffen. Diese verursachen Probleme bei der Trinkwassergewinnung, sowie eine steigende Anfälligkeit der Pflanzen gegenüber Schädlingen und Krankheiten.

Zur Beschreibung des Eutrophierungspotentials verschiedener Stoffe dient das Phosphatanionen-Äquivalent ($\text{PO}_4^{3-} - \text{Äq.}$) [86, 87].

Erneuerbare Primärenergie (PEe)

Der Primärenergiebedarf eines Produkts beschreibt die Energiemenge, die für dessen Herstellung von Energieträgern benötigt wird, die zuvor keine anthropogene Umwandlung durchlaufen haben. Erneuerbare Energiequellen wie Sonnenstrahlung, Wind- und Wasserkraft und aus Biomasse gewonnene Energie leisten einen Beitrag zur Schonung der Umwelt, sofern sie einen hohen Anteil des Primärenergiebedarfs abdecken [86].

Nicht erneuerbare Primärenergie (PEne)

Aus endlichen Energiequellen wie Erdgas, Erdöl, Kohle oder Uran gewonnene Energie zählt zum nicht erneuerbaren Anteil der Primärenergie [86].

3. Entwicklungsansätze und Bauprojekte

Um die Entwicklung von Infraleichtbeton zu beschreiben, werden im Folgenden zunächst die Eigenschaften von Leichtbeton zusammengefasst. Der Fokus liegt hierbei auf der mit der Dichte reduzierten Wärmeleitfähigkeit, sowie auf der Zusammensetzung und Herstellung von Leichtbetonen. Je nach Gefügestruktur wird zwischen gefügedichtetem Leichtbeton (vgl. Abschnitt 3.1) und haufwerksporigem Leichtbeton (vgl. Abschnitt 3.2) unterschieden. Mit fortschreitender Entwicklung von leistungsfähigeren Leichtbetonen wurden erste Gebäude in monolithischer Bauweise errichtet (vgl. Abschnitt 3.3). Verschärfte Anforderungen an die energetische Leistungsfähigkeit von Gebäudehüllen unterbanden den monolithischen Einsatz von Leichtbeton in den 1970-er Jahren jedoch [88]. Erst mit einer weiteren Reduzierung der Betondichte im Zuge der Weiterentwicklung von Leichtbeton zu Infraleichtbeton wurde die Herstellung von Betonen möglich, die erneut eine monolithische Bauweise erlauben (vgl. Abschnitte 3.4 und 3.5).

3.1. Eigenschaften von Leichtbeton

Leichtbeton ist nach DIN EN 206 [33] und DIN EN 1992 [89] Beton mit einer Rohdichte zwischen 800 kg/m^3 und 2000 kg/m^3 . Die Dichte von Beton wird durch die Verwendung leichter Gesteinskörnung oder das Porosieren der Matrix mittels Luftporenbildnern reduziert. Kornporige Leichtbetone, die leichte Gesteinskörnung enthalten, sind aufgrund des geschlossenen Gefüges bei ausreichender Matrixfestigkeit auch mit hohen Festigkeiten herstellbar und konstruktiv einsetzbar. Matrix- und haufwerksporige Leichtbetone werden nach [6] aufgrund der niedrigeren Druckfestigkeiten von 2 N/mm^2 bis 15 N/mm^2 als wärmedämmende Leichtbetone bezeichnet, die ausschließlich als Mauersteine und in Wandelementen Verwendung finden. Diese Aussage impliziert jedoch eine Eignung für Gebäude mit bis zu vier Stockwerken. Nach DIN EN 1520 [12] ist haufwerksporiger Leichtbeton dementsprechend auch für tragende Bauteile wie Wandelemente, Dach- und Deckenbauteile geeignet. Auch die Druckfestigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton wird hier höher angesetzt und ist bis zur Festigkeitsklasse LAC 25 mit einer charakteristischen Druckfestigkeit von 25 N/mm^2 geregelt. Nach [90] ermöglicht die

Verwendung einer porosierten Matrix bei der Herstellung haufwerksporiger Leichtbetone eine Festigkeitssteigerung bei gleichbleibender Rohdichte (vgl. Abschnitt 3.2).

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist die industrielle Fertigung von leichter Gesteinskörnung wie Blähton und Blähglas möglich [6]. Beide Gesteinskörnungen haben die für die Verarbeitbarkeit positive runde Form gemeinsam, deren Herstellung in verschiedenen Korngrößen erfolgt. Im Gegensatz zu Blähton weist Blähglas jedoch eine vernachlässigbare Wasseraufnahme auf, wodurch ein Vornässen der Gesteinskörnung nicht erforderlich ist. In [91] wird die Wasseraufnahme von Blähglas innerhalb einer Stunde mit $< 2,0 \text{ M.} - \%$ angegeben, was sich mit der ermittelten Wasseraufnahme von etwa $1,0 \text{ M.} - \%$ deckt.

Die geringe Trockenrohichte von Leichtbeton führt neben einem Festigkeitsabfall zu einer verbesserten wärmedämmenden Wirkung des Baustoffs [6, 13, 92, 93]. Die hohe Porosität von Leichtbetonen führt nach [94] infolge einer erhöhten Wasserdurchlässigkeit, einem schnelleren Carbonatisierungsfortschritt und einer Reduktion des Chlorideindringwiderstands zu einer verringerten Dauerhaftigkeit. Werden Zusatzstoffe verwendet, wirkt das in der Folge dichtere Gefüge der erhöhten Durchlässigkeit bei der Verwendung leichter Gesteinskörnung jedoch entgegen. Auch in [95] wird infolge der Verwendung leichter Gesteinskörnung ein nachlassender Diffusionswiderstand von Beton berichtet, während in [96] mit der Zugabe von Silikastaub eine Verringerung der Durchlässigkeit und Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Leichtbeton erzielt wird.

In [92] wurde im Rahmen einer Versuchsreihe die feine Gesteinskörnung eines Leichtbetons teilweise und vollständig durch verschiedene Leichtsande aus Blähton, Blähschiefer und Bims ersetzt. Der Abfall der Trockenrohichte wurde mit der Reduktion von Druckfestigkeit, E-Modul und Wärmeleitfähigkeit ins Verhältnis gesetzt. Die Erhöhung des Anteils an leichter Gesteinskörnung führte in Abhängigkeit der gewählten leichten Gesteinskörnung zu einem Festigkeitsverlust zwischen $2,3 \text{ N/mm}^2$ und $3,8 \text{ N/mm}^2$ und zu einer Verringerung des E-Moduls um 1700 N/mm^2 bis 2600 N/mm^2 je 100 kg/m^3 reduzierte Dichte. Gleichzeitig wurde die Wärmeleitfähigkeit um $0,1 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ bis $0,16 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ gesenkt. Bei vollständigem Austausch der feinen Gesteinskörnung durch Leichtsand zeigt die Bandbreite der Betoneigenschaften den Einfluss der leichten Gesteinskörnung, die je nach Herkunft in Zusammensetzung, Dichte und Kornform variiert. Die Rohdichte der hergestellten Leichtbetone liegt zwischen 1170 kg/m^3 und 1350 kg/m^3 , die Druckfestigkeit zwischen 22 N/mm^2 und 35 N/mm^2 , der E-Modul bei $11\,000 \text{ N/mm}^2$ bis $17\,000 \text{ N/mm}^2$ und die Wärmeleitfähigkeit wird auf $0,43 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ bis $0,57 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ reduziert.

3.1.1. Wärmeleitfähigkeit und thermische Behaglichkeit

Auch in [97] wurde zur Bewertung der Wärmeleitfähigkeit von Leichtbeton ein mit Flusssand und gebrochener grober Gesteinskörnung hergestellter Normalbeton als Re-

ferenz betrachtet. Der Austausch sowohl der feinen Gesteinskörnung durch Schlacke als auch der groben Gesteinskörnung durch Blähschiefer führte zu einer Abnahme der für Normalbeton ungewöhnlich niedrigen Wärmeleitfähigkeit von $0,76 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ auf $0,48 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Mit Zugabe von Luftporenbildnern wurde eine weitere Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit auf $0,40 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ erreicht. Auch wenn die für den Normalbeton angegebene Wärmeleitfähigkeit von $0,76 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ zu niedrig ist, ist durch eine Steigerung der Porosität über die Verwendung leichter Gesteinskörnung oder LP-Bildner eine deutliche Verringerung der Wärmeleitfähigkeit von Beton möglich.

Die Luft in den Poren weist mit nur $0,026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ eine geringere Wärmeleitfähigkeit auf als der Feststoffanteil der Matrix [74], weshalb hohe Porositäten die Wärmeleitfähigkeit des Betons maßgeblich reduzieren. Porenform und -größe sowie die Homogenität des Porengefüges beeinflussen die Wärmeleitfähigkeit ebenfalls, wobei gleichmäßig verteilte runde Poren mit einem Durchmesser von unter $300 \mu\text{m}$ positiv wirken [98].

Die Wärmeleitfähigkeit bildet über die Berechnung des U-Werts die Grundlage zur Dimensionierung von Wandquerschnitten. Doch Unterschiede in der spezifischen Wärmekapazität und Dichte sowie in der Anordnung der einzelnen Baustoffe führen auch bei gleichem U-Wert zu voneinander abweichenden Bewertungen der thermischen Behaglichkeit in Abhängigkeit des Wandaufbaus. So führt eine Außendämmung zu einem geringeren Wärmeaustausch der Wand mit der Außenluft, in der Folge bleibt die im Wandbauteil gespeicherte Wärmemenge erhalten. Damit trägt die Wand über ihre Wärmespeicherkapazität zur Regulierung der Raumtemperatur bei.

Die Speicherkapazität von Baustoffen mit Rohdichten unter $1200 \text{ kg}/\text{m}^3$ ist verhältnismäßig gering, was eine niedrige Amplitudendämpfung der Temperatur zur Folge hat. Temperaturschwankungen sind bei leichten Bauweisen im Rauminneren deutlicher spürbar als bei Außenwänden mit hoher thermischer Trägheit. Die Amplitudendämpfung beschreibt also die von der Speicherfähigkeit des Wandbauteils abhängige Verringerung der Temperaturschwankungen an der raumseitigen Wandoberfläche.

Die Phasenverschiebung beschreibt die Verzögerung, mit der eine Temperaturänderung auf der Innenseite der Wand zu beobachten ist. Insbesondere für den sommerlichen Wärmeschutz ist, je nach Ausrichtung der Außenwand, eine Phasenverschiebung von 7 bis 9 Stunden für eine ausreichende thermische Behaglichkeit erforderlich. Während eine 25 cm dicke Betonwand mit einer 5 cm dicken Kerndämmung zu einer Phasenverschiebung von 7,5 h führt, bewirkt eine verputzte Außenwand mit 30 cm Leichtbeton-Vollsteinen eine Phasenverschiebung von über 10 h [71, 74].

Nach [4] ist Infraleichtbeton aufgrund der geringen Trockenrohichte und der damit verbundenen niedrigen Wärmespeicherzahl zwar ein Baustoff mit geringer thermischer Trägheit, der jedoch einen monolithischen Wandaufbau ermöglicht und damit durch

die über den gesamten Querschnitt einheitlichen thermischen Eigenschaften mit einer Konstruktion mit hoher thermischer Trägheit vergleichbar ist. In einer Simulation wurde sowohl der Heiz- und Kühlenergiebedarf als auch die Behaglichkeit für ein Büro- und ein Wohngebäude mit verschiedenen Wandaufbauten verglichen [4]. Neben einer monolithischen Wand aus Infralichtbeton wurden zwei konventionelle Wandaufbauten betrachtet. Von diesen beiden mehrschichtigen Wänden ist eine in Massivbauweise ausgeführt, die andere in Leichtbauweise.

Der Heiz- und Kühlenergiebedarf für ein Gebäude aus Infralichtbeton ist demnach mit dem eines Gebäudes in Massivbauweise vergleichbar, beide Bauweisen führen zu einem niedrigeren Kühlenergiebedarf als die Leichtbauweise. Und auch wenn die Gefahr der Überhitzung in dem Infralichtbetongebäude im Vergleich mit dem Massivbau um 22 % erhöht ist, wird die Überhitzungsgefahr im Vergleich zum Leichtbau deutlich reduziert. Die simulierten Temperaturverläufe legen zudem nahe, dass ein Gebäude aus Infralichtbeton mit einem Gebäude in Massivbauweise verglichen werden kann, bei kurzen Heizperioden im Anschluss an eine Nichtnutzung jedoch einem Gebäude in Leichtbauweise ähnelt.

3.1.2. Schallschutz

Mit der insbesondere im städtischen Raum hohen Lärmbelastung ist auch die Bedeutung des Schallschutzes von Gebäuden gestiegen. Entsprechend wird Leichtbeton zunehmend nicht nur in Bezug auf die reduzierte Wärmeleitfähigkeit, sondern auch mit Blick auf die akustischen Eigenschaften untersucht [97, 99]. Das Schalldämm-Maß R von Bauteilen ist sowohl von der Frequenz als auch von der flächenbezogenen Masse m' abhängig. Nach dem Bergerschen Massengesetz steigt das Schalldämm-Maß mit steigender Frequenz und steigender Masse des Bauteils. Die Erhöhung des Schalldämm-Maßes beträgt sowohl bei einer Verdopplung der flächenbezogenen Masse als auch bei einer Verdopplung der Frequenz +6 dB [100]. Aufgrund der geringen Masse von Leichtbeton wurde dessen schalldämmende Wirkung zunächst als vernachlässigbar betrachtet [101]. Während die Wärmeleitfähigkeit in [97] durch den Austausch der Gesteinskörnung und die Zugabe von Luftporenbildnern annähernd halbiert werden konnte, lagen die Messwerte der schalldämmenden Wirkung über den geprüften Frequenzbereich für alle Betone in der gleichen Größenordnung.

In Bezug auf Trittschall wurde bei Frequenzen über 800 Hz für verschiedene Leichtbetone zwar ein höheres Schalldämm-Maß gemessen als für Normalbeton. Bei Fußböden beeinflusst der komplette Aufbau die schalldämmende Wirkung jedoch maßgeblich, so dass sich die Werte für Leicht- und Normalbeton angleichen können [93].

Weitere Untersuchungen zeigten im Vergleich mit Normalbeton mit dichter Matrix eine um das zehnfache erhöhte Schallabsorption von matrixporigen Betonen. Das wird

darauf zurückgeführt, dass die schalldämmende Wirkung neben der flächenbezogenen Masse vom Porenvolumen sowie von der Porenform und -größenverteilung beeinflusst wird [102]. Eine raue innere Oberfläche sowie Öffnungen zwischen den Poren erhöhen den Strömungswiderstand und damit die Schallabsorption. Der Frequenzbereich, in dem Schall gedämpft wird, wird dabei von der vorherrschenden Porengröße beeinflusst. Eine weitgestufte Porengrößenverteilung führt folglich zu einer über weite Frequenzbereiche hohen Schallabsorption [98]. Untersuchungen an offenporigen Aluminiumschäumen zeigten einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Durchmesser der Öffnungen zwischen den Poren und dem gemessenen Strömungswiderstand. Dieser steigt, je kleiner die Öffnungen sind, wodurch niedrige Frequenzen stärker gedämpft werden. Auch für geschlossen- und gemischtporige Metallschäume gilt, dass Risse und Öffnungen in der Porenwand die Schallabsorption beeinflussen [103]. Nach den Beobachtungen in [98] gilt dieser Zusammenhang auch für zementgebundene Schäume.

3.1.3. Zusammensetzung und Herstellung

Bei der Verarbeitung von Leichtbeton sind einige Besonderheiten zu beachten. So ist der Frischbeton bei der Verwendung von saugender Gesteinskörnung nicht absolut volumenstabil. Mittels LP-Bildner eingebrachte Luftporen sind im Frischbeton ebenfalls nicht vollständig stabil, gleichzeitig machen sich herstellbedingte geringe Schwankungen in der Dichte aufgrund der geringen Dichte der leichten Gesteinskörnung deutlicher bemerkbar. In der Gesteinskörnung enthaltene Feuchte erhöht die Masse signifikant, folglich ist eine volumenbasierte Abmessung der Gesteinskörnung zu bevorzugen [6].

Im Rahmen der Mischungsentwicklung von Beton ist grundsätzlich eine geringe Hydratationswärmeentwicklung anzustreben, um die Rissbildungsgefahr aufgrund eines erhöhten Temperaturgefälles zwischen Bauteilkern und -oberfläche zu minimieren [104]. Da das Abklingen der Hydratationswärme durch die niedrige Wärmeleitfähigkeit der leichten Gesteinskörnung verzögert wird, ist im Vergleich mit Normalbeton mit einer höheren Wärmeentwicklung zu rechnen. Deshalb wird für die Herstellung von Leichtbeton die Verwendung von Zementen mit niedriger Anfangsfestigkeit bzw. niedriger Hydratationswärmeentwicklung empfohlen [6]. Im Rahmen der Entwicklung eines Infraleichtbetons sind in [32] bei der Verwendung sowohl eines CEM II/A-S 42,5 N als auch eines CEM I 42,5 R im Inneren von 50 cm dicken Probekörpern Frischbetontemperaturen von über 100 °C dokumentiert.

Zudem wirken sich die rheologischen Eigenschaften des Zementleims entscheidend auf die Frischbetonstabilität aus, je größer der Dichteunterschied zwischen Zementleim und leichter Gesteinskörnung ist. Insbesondere bei der Verwendung von Blähglas mit Trockenrohdichten zwischen 282 kg/m³ und 512 kg/m³ (Liaver) besteht bei weichen Betonen Entmischungsgefahr [6], was bei der Wahl der Ausgangsstoffe zu berücksichtigen ist.

Eine Zementsubstitution durch Zusatzstoffe reduziert die Hydratationswärme. Da bei Leichtbetonen zur Festigkeitssteigerung häufig ein höherer Zementleimgehalt verwendet wird, ist die Zugabe von Zusatzstoffen neben betontechnologischen auch aus ökonomischen Gründen sinnvoll.

Silikastaub

Die Eigenschaften von Leichtbeton lassen sich mit der Zugabe von Silikastaub deutlich verbessern [94]. Die Feinheit des überwiegend aus SiO_2 bestehenden glasartigen Silikastaubs liegt mit einem mittleren Partikeldurchmesser von etwa $0,1 \mu\text{m}$ um das hundertfache über der von Portlandzement, wodurch die Frischbetonstabilität erhöht wird. Die hohe Reaktivität des Puzzolans verdichtet die Matrix und bei Normalbeton auch die Kontaktzone zur Gesteinskörnung [57]. Mit der Verwendung von Bims als leichte Gesteinskörnung wird durch die Zugabe von Silikastaub eine deutliche Steigerung der Betonfestigkeit erzielt. Diese Festigkeitssteigerung fällt in Kombination mit Blähperlit gering aus, da die Reaktionsprodukte in den Porenraum der Gesteinskörnung hineinwachsen [94]. Bei Leichtbetonen, die Silikastaub und Blähton enthalten, war der Einfluss auf Festigkeitsbildung, Spaltzugfestigkeit und E-Modul ebenfalls gering. Die Dichtheit des Gefüges, die anhand des Chlorideindringwiderstands überprüft wurde, war jedoch verbessert [105]. In Kombination mit Blähschiefer bewirkte jedoch schon die Zementsubstitution von 3,5 % durch Silikastaub eine Festigkeitssteigerung um 11 %. Während die Zugabe von Silikastaub die Stabilität von Leichtbeton durch die erhöhte Viskosität des Leims sowie die Dichtheit der Matrix und damit die Dauerhaftigkeit grundsätzlich erhöht, ist die Auswirkung auf die Betonfestigkeit von der Art der leichten Gesteinskörnung abhängig [94].

Flugasche

Die Verwendung von Flugasche wirkt sich ebenfalls aufgrund der puzzolanischen Reaktion positiv auf die Hydratationswärmeentwicklung und die Dichtheit des Gefüges aus. Auch der Füllereffekt, der durch das Ausfüllen der Hohlräume zwischen den Zementpartikeln sowohl die Packungsdichte verbessert als auch die Zementhydratation in der Anfangsphase beeinflusst, wirkt sich bei Flugasche ebenso wie bei anderen Zusatzstoffen positiv aus. Die annähernd ideal runde Partikelform von Flugasche führt im Frischbeton bei gleichbleibender Wassermenge zu verbesserter Fließfähigkeit [17]. Auch wenn sich der Gesamtporenraum beim Austausch von Zement durch Flugasche vergrößert, wird das Porengefüge feiner, so dass die überwiegend in den Kapillarporen stattfindenden Transportprozesse reduziert werden [106]. Die anfangs verzögerte Festigkeitsentwicklung von Normalbeton mit Flugasche hin zu vergleichsweise hohen Endfestigkeiten ist auch

bei Leichtbeton zu beobachten. Ein für die Mischungsentwicklung von Leichtbeton interessanter Aspekt ist die im Vergleich zu Zement niedrigere Rohdichte, die die Dichte des Betons reduziert und in Messungen der Wärmeleitfähigkeit an Zementstein eine Verringerung um 18 % bewirkte [94].

Hüttensand

In Hochofenzement enthaltener Hüttensand wirkt sich positiv auf die Verarbeitbarkeit von Leichtbeton aus [94]. Hüttensand ist ein latent hydraulischer Zusatzstoff, auf dessen Oberfläche sich beim Kontakt mit Wasser infolge der Lösung von Calcium-Ionen eine Gelschicht bildet, die eine weitere Reaktion zunächst verhindert. Erst die Reaktion dieser Gelschicht mit den im Zement enthaltenen Aktivatoren Kalk, Calciumsulfat und Alkalien führt zur Bildung von CSH-Phasen und Ettringit [57].

Diese erst durch die Zementhydratation in Gang gesetzte Reaktion führt ebenfalls zu niedrigeren Frühfestigkeiten, deren Steigerung aber durch eine Lagerung bei 60 °C möglich ist. Trotzdem sinken die Festigkeiten bei der Zementsubstitution mit mehr als 20 % im Allgemeinen. Bei Beaufschlagung mit hohen Temperaturen von 400 °C reduziert die gröbere Porenstruktur von Leichtbeton mit einem Hüttensandgehalt von 70 % des Bindemittels dagegen den Festigkeitsverlust des Betons, da verdampfendes Wasser entweicht, ohne Schädigungen hervorzurufen. Die Porenstruktur begünstigt auch den Carbonatisierungsfortschritt, der an Leichtbetonen mit 25 % bis 40 % Hüttensand und Blähton im Schnelltest den Referenzbeton um das Vierfache übertraf. Am gleichen Beton wurde dennoch eine geringere Wasserdurchlässigkeit gemessen, was bei Hüttensandgehalten in dieser Größenordnung auf eine Verdichtung des Porengefüges durch die nachgelagerte Reaktion hinweist. Weitere Versuche zeigten mit der Erhöhung des Chlorideindringwiderstands und der Verringerung der Wasseraufnahme ebenfalls, dass die Zugabe von Hüttensand ein dichtes Gefüge bewirkt. Die Verringerung der Wärmeleitfähigkeit von Leichtbeton mit Hüttensand wird auf die geringfügig niedrigere Dichte von Hüttensand im Vergleich mit Zement zurückgeführt [94].

Gebranntes Tonmehl

Das Tonmineral Kaolin wirkt nach thermischer Aktivierung puzzolanisch. Bei Brenntemperaturen zwischen 450 °C und 750 °C entweicht Wasser zwischen den Alumosilikatschichten des Kaolins, wodurch es zu Metakaolin wird. Während der Zementhydratation reagiert das Metakaolin mit den Silikatphasen des Zements zu CSH-Phasen [107]. Aufgrund ihrer hohen Partikelfinheit und der beim Aufmahlen des Materials entstehenden rauen Oberfläche weisen Metakaoline ähnlich wie Silikastaub einen hohen Wasser- und Fließmittelbedarf auf. Infolge der Füllerwirkung und der

puzzolanischen Reaktion wird bei einer Zementsubstitution mit 10 % bis 15 % Metakaolin in der Regel eine Steigerung der mechanischen Eigenschaften sowie eine Verbesserung der Dauerhaftigkeit erzielt [94]. Die reduzierte Wärmeleitfähigkeit von Betonen, die Metakaolin enthalten, ist auf die geringe Wärmeleitfähigkeit von Metakaolin zurückzuführen, die mit $\lambda = 0,19 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 34 % unter der von Zement liegt [108].

Glasmehl

Steht die Wärmeleitfähigkeit im Fokus der Mischungsentwicklung, ist Glasmehl ein geeigneter Zusatzstoff. Der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von Glas liegt zwischen $1,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (Natronglas) und $1,4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (Quarzglas) [83]. Die Wärmeleitfähigkeit von rezyliertem Glasbruch nach der Aufbereitung in Korngrößenfraktionen von 0,5–1 mm und 1–2 mm, der in [108] anstelle von feiner Gesteinskörnung verwendet wird, ist mit $0,18 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ angegeben.

In [94] wird Glasmehl reaktiver als Flugasche, aber weniger reaktiv als Hüttensand und Silikastaub eingestuft, verbessert nach [107] aber sowohl die Verarbeitbarkeit als auch die Festigkeit von ultrahochfesten Betonen. Wird Altglas aufgemahlen, ist die Verwendung von Glasmehl auch ökologisch gesehen vorteilhaft [108]. Dieser Effekt wird durch die erhöhte Reflexion von Sonneneinstrahlung glasmehlhaltiger Sichtbetone verstärkt, da in der Folge der zur Gebäudeklimatisierung erforderliche Energiebedarf sinkt [107]. Da Deutschland in der gemäßigten Klimazone liegt, ist der Klimatisierungsbedarf für Wohngebäude zwar gering. Jedoch werden etwa 50 % der Bürogebäude aufgrund des höheren Glasanteils und geringerer Beschattung im Sommer gekühlt [109].

Kalksteinmehl

Kalksteinmehl ist aufgrund der breiten Verfügbarkeit und der großen Bandbreite an Mahlfeinheiten ein Zusatzstoff, der sich zur Optimierung von Betonzusammensetzungen anhand der Packungsdichte eignet und durch den Füllereffekt die Frühfestigkeit von Beton steigert [110]. Nach DIN EN 206 – 1 [33] sind Gesteinsmehle nahezu inaktive Zusatzstoffe. Calciumcarbonat, aus dem Kalksteinmehl überwiegend besteht, reagiert jedoch mit dem Tricalciumaluminat aus dem Zement zu Carboaluminaten und wirkt damit auch neben dem Füllereffekt festigkeitsbildend [57].

Da der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von Kalkstein mit $\lambda_B = 2,3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bei $\rho = 2600 \text{ kg}/\text{m}^3$ [83] vergleichsweise hoch ist, eignet sich Kalksteinmehl nur eingeschränkt zur Entwicklung von Betonen mit niedriger Wärmeleitfähigkeit.

Zusatzmittel

Neben Fließmitteln zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit sind Luftporenbildner ein wichtiges Zusatzmittel für die Herstellung von Leichtbeton. Dabei handelt es sich um grenzflächenaktive Substanzen mit einem hydrophilen und einem hydrophoben Bestandteil [111, 112]. LP-Bildner stabilisieren die durch die Bewegung des Mischwerkzeugs eingebrachte Luft im Frischbeton, so dass die Luft weder entweicht, noch sich zu großen Poren zusammenschließt [113]. Zum einen bindet sich der hydrophile Teil an Zementpartikel, was ein Entlüften verhindert, zum anderen bewirkt der sterische Effekt des durch den LP-Bildner gebildeten Films zwischen Luft und Wasser eine gleichmäßige Verteilung der Luftporen im Beton [111]. Das Gesamtvolumen der feinen Luftporen steigt sowohl mit der enthaltenen Menge an LP-Bildner, als auch mit zunehmender Viskosität des Frischbetons [114]. Mittels Luftporenbildner in den Beton eingebrachte Poren sind Mikrokugeln mit einem Durchmesser zwischen 10 μm und 100 μm , die zunächst die Verarbeitbarkeit des Betons verbessern und im erhärteten Zustand den Frost-Tau-Widerstand des Betons erhöhen [113, 115]. Das eingebrachte Porenvolumen verringert das Feststoffvolumen, wodurch der Beton leichter und weicher wird [116]. Ähnlich wie bei der Verwendung von Flugasche wirkt sich die runde Porenform infolge einer reduzierten Fließgrenze positiv auf die Fließfähigkeit des Frischbetons aus [113, 115]. Bei einer Dosierung des LP-Bildners, die zu 50 l bis 60 l Luftporen anstelle der üblichen 10 l bis 20 l im Beton führt, ermöglicht die höhere Fließfähigkeit eine Reduktion des Anmachwassers, wodurch ein Festigkeitsverlust aufgrund der enthaltenen Luftporen verhindert wird. Im Festbeton unterbrechen die Luftporen die Kapillaren, wodurch Transportmechanismen, die zu Schädigungen führen können, reduziert werden. Die Größenordnung der Poren erlaubt sowohl die Volumenzunahme von gefrierendem Wasser, als auch die Aufnahme von Reaktionsprodukten wie Ettringit, ohne dass es zu einer Rissbildung im Beton kommt [113].

Wird Mineralschaum mit einem sehr hohen Porengehalt hergestellt, beeinflusst die Art des Luftporenbildners die Porenstruktur. Neben Luftporenbildnern auf Tensid- oder Harzbasis eignen sich auch Proteine zum Aufschäumen von Suspensionen. Proteine bilden einen dicken Grenzflächenfilm um die Luftporen, so dass sich zementgebundene Proteinschäume durch eine hohe Stabilität auszeichnen, die Wirkung entfaltet sich jedoch langsamer [112]. Die im Vergleich zu Mineralschäumen auf Tensidbasis geschlossene Porenstruktur (vgl. Abbildung 3.1) führt zu einer geringeren Wasseraufnahme. Der zementgebundene Schaum auf Tensidbasis zeichnet sich durch kleinere Poren mit dünneren Stegen und Durchbrüchen zwischen den Poren aus. In [117] ist für Schaumbeton auf Proteinbasis ebenfalls eine geschlossene Porenstruktur dokumentiert, allerdings mit vergleichsweise kleinen Luftporen. Das legt, ebenso wie die in Abbildung 5.2 dargestellte Porenstruktur des Warmbetons nahe, dass der Feststoffgehalt die sich bildende Porenstruktur beeinflusst.

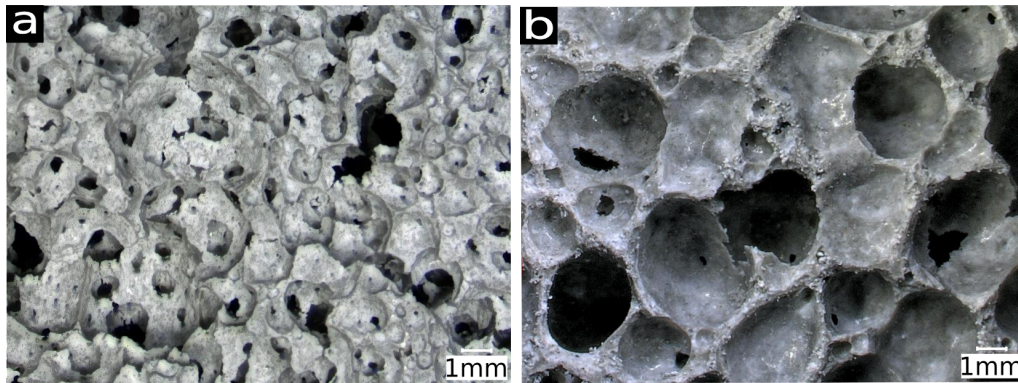


Abbildung 3.1.: Zwanzigfache Vergrößerung von a) Mineralschaum auf Tensidbasis mit der charakteristischen offenzelligen Struktur und b) Mineralschaum auf Proteinbasis mit größeren Poren und dicker Porenwandung ohne Durchbrüche [118]

Die Wirkung von Luftporenbildner lässt bei steigendem Alkaligehalt des Zements nach [111]. Auch ein hoher Wassergehalt oder die verflüssigende Wirkung von Fließmitteln beeinträchtigen die Wirksamkeit von LP-Bildnern, da die Luft aus fließfähigen Betonen schneller entweicht [114]. Insbesondere die leistungsstarken Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis (PCE-Fließmittel) bringen häufig auch chemische Wechselwirkungen mit Luftporenbildnern mit sich. Da diese Fließmittel während des Mischvorgangs Luft in den Beton einbringen, sind sie häufig mit einem Entschäumer versetzt [111], der die Wirkung von LP-Bildnern entsprechend reduziert, wodurch höhere Dosierungen erforderlich werden. Gleichzeitig sind die durch das Fließmittel eingebrachten Luftporen größer [119]. In der Folge sinkt der Frost-Tau-Widerstand, da die größeren Poren bei gleichem Luftvolumen weiter auseinander liegen. Die Kompatibilität mit weiteren Zusatzmitteln wie Verzögerer und Beschleuniger ist grundsätzlich im Rahmen der Mischungsentwicklung zu überprüfen [111].

Auch Zusatzstoffe wie Flugasche und Hüttensand können die Wirksamkeit von LP-Bildnern reduzieren, wohingegen keine negativen Wechselwirkungen mit Silikastaub bekannt sind. Auch ein hoher Anteil an feiner Gesteinskörnung begünstigt im Gegensatz zu grober Gesteinskörnung die Bildung von Luftporen, ebenso wie Temperatur und Mischregime die Wirkung von Luftporenbildnern beeinflussen [111, 114].

Chemische Erstarrungsbeschleuniger beeinträchtigen häufig sowohl die Endfestigkeit als auch die Dauerhaftigkeit, weshalb zur Beschleunigung der Hydratation zunächst die Verwendung eines Zements mit einem hohen Gehalt der schnell reagierenden Klinkerphasen C_3S und C_3A geprüft werden sollte [120]. Da bei diesen Klinkerphasen jedoch auch eine hohe Wärmemenge freigesetzt wird, ist der Einsatz bei der Herstellung von Leichtbetonen in der Regel nicht zielführend [6]. Das Absenken des Wasserbindemittelwerts

ermöglicht ebenfalls eine Beschleunigung der Erhärtung, ohne die Festbetoneigenschaften zu beeinträchtigen [120].

Viskositätsmodifizierer erhöhen die Viskosität und ermöglichen damit auch bei niedrigen Mehlkornggehalten eine hohe Stabilität und Robustheit des Frischbetons. Um sowohl eine niedrige Fließgrenze und damit eine hohe Fließfähigkeit des Betons als auch eine hohe Viskosität, die ein Entmischen des bereits verarbeiteten Betons bis zum Erstarren verhindert, zu erreichen, werden Viskositätsmodifizierer häufig in Kombination mit Fließmitteln eingesetzt [121, 122].

Neben Erstarrungsverzögerern wirken auch andere Zusatzmittel verzögernd. Durch verzögernde Zusatzmittel wird in der Regel die Ruhephase der Hydratation verlängert, der Beton ist also länger verarbeitbar. Messungen im Kalorimeter zeigen jedoch nicht nur einen späteren Anstieg der Hydratationswärme, sondern auch die langsamere Zunahme und ein niedrigeres Temperaturmaximum [123]. In Abschnitt 4.3.3 sind mit einem Betonkalorimeter ermittelte Messkurven dargestellt, die die Wirkung von Ausgangsstoffen und Umgebungstemperatur auf das Erstarrungsverhalten von Beton aufzeigen. Nach [123] wirken PCE-Fließmittel stärker verzögernd als andere Fließmittel, die Einflüsse auf die Hydratation sind jedoch komplex und nicht vollständig geklärt. Zucker, die beispielsweise in den zur Betonverflüssigung verwendeten Lignosulfonaten oder LP-Bildern auf Harzbasis enthalten sind, sind ebenfalls als starke Verzögerer bekannt. Bei der Kombination von verzögernd wirkenden Fließmitteln und Beschleunigern treten häufig Wechselwirkungen auf, was ein Abstimmen der einzelnen Zusatzmittel aufeinander bei gleichzeitiger Anwendung erforderlich macht [124].

In einer Versuchsreihe [97] wurde ein Leichtbeton ohne, mit 0,5 M. – %, 1,0 M. – % und 1,5 M. – % Luftporenbildner bezogen auf den Zementgehalt hergestellt. Durch die Zugabe von 1,0 M. – % LP-Bildner vergrößerte sich das Ausbreitmaß von 20 cm auf 57 cm, die Konsistenz veränderte sich also von steif zu fließfähig. Eine höhere Dosierung des LP-Bidners ging mit einer Verringerung des Ausbreitmaßes auf 48,5 cm einher, ist in Bezug auf die Verarbeitbarkeit folglich nicht zielführend. Auch die Dichte des Betons sank bei einer Zugabe von $\leq 1,0$ M. – %, stieg bei höheren Dosierungen jedoch wieder an. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass die Grenzschicht zwischen Luftporen und Beton bei erhöhter Porengröße und -anzahl instabil wird und die Luftporen bei einer solchen Überdosierung zusammenfallen. Die Porosität des Betons einschließlich der leichten Gesteinskörnung war bei der Verwendung von 1,0 M. – % LP-Bildner mit 34 Vol. – % um 5 Vol. – % höher als bei der Herstellung ohne LP-Bildner. Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit sanken im Zusammenhang mit der Rohdichte [97].

Leichte Gesteinskörnung

Die Anforderung an leichte Gesteinskörnung für Beton ist in DIN EN 13055 [125] geregelt. Leichte Gesteinskörnung zeichnet sich durch eine im Vergleich mit normaler Gesteinskörnung geringere Kornrohichte von $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$ aus und ist mineralischen Ursprungs. Nach DIN 1045-2 [126] wird zwischen natürlicher leichter Gesteinskörnung wie Lava, Naturbims und Tuff und industriell hergestellter leichter Gesteinskörnung wie Blähton, Blähglas, Blähperlit und Blähschiefer unterschieden. Während natürliche leichte Gesteinskörnung bereits vor 3000 Jahren für die Herstellung von Leichtbeton verwendet wurde [10], ist die industrielle Fertigung von leichter Gesteinskörnung wie Blähton und Blähglas seit Beginn des 20. Jahrhunderts möglich [6].

Blähperlit entsteht bei Temperaturen über 870°C , die zu einer Volumenzunahme des Gesteins um das vier- bis zwanzigfache führen [127]. Sowohl für die Herstellung von Blähton als auch von Blähglas wird der Ausgangsstoff vor dem Brennen aufgemahlen und granuliert [6, 128]. Entsprechend haben beide Gesteinskörnungen eine runde Kugelform, die sich positiv auf die Verarbeitbarkeit von Frischbeton auswirkt [15]. Das Innere der Gesteinskörnung ist nach dem Brennen hochporös, die Oberfläche dagegen geschlossen [91]. Trotz der geschlossenen Oberfläche nimmt Blähton ebenso wie Blähperlit Wasser auf. Die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung ist bei der Mischungsentwicklung entweder durch ein Vornässen der leichten Gesteinskörnung oder durch ein erhöhtes Anmachwasservolumen zu berücksichtigen. Anderenfalls wird dem Frischbeton das für die Verarbeitbarkeit und Hydratation erforderliche Wasser entzogen [22, 92, 127].

Blähglas weist dagegen mit einer Wasseraufnahme von ungefähr 1 M. – % innerhalb einer Stunde [22] eine vernachlässigbare Wasseraufnahme auf und ist damit ohne Vornässen verarbeitbar. Zudem wird das Recycling von Altglas als nachhaltig angesehen [91, 108]. Sowohl die geringe Kornrohichte des Blähglases von Liaver zwischen 282 kg/m^3 und 512 kg/m^3 in Abhängigkeit der Korngrößenfraktion (vgl. Tabelle 4.3) als auch die geringe Wärmeleitfähigkeit von $0,07 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [129] wirken sich positiv auf die Herstellung sehr leichter Betone mit reduzierter Wärmeleitfähigkeit aus.

Volumenanteil der leichten Gesteinskörnung

Da bei Leichtbetonen die Festigkeit der Gesteinskörnung in der Regel niedriger als die Matrixfestigkeit ist, werden Druckspannungen um die leichte Gesteinskörnung herum über den Zementstein abgetragen [6]. Die Betondruckfestigkeit liegt in diesem Fall oberhalb der Grenzfestigkeit nach Grübl [130], die den Einfluss der leichten Gesteinskörnung auf die Festigkeit beschreibt. Niedrige Festigkeiten der Gesteinskörnung begrenzen die Betonfestigkeit im Bereich oberhalb der Grenzfestigkeit, wohingegen Betonfestigkeiten die von der Matrixfestigkeit bestimmt werden, unterhalb der Grenzfestigkeit liegen. Nach Sell [131] wird die Druckfestigkeit von Leichtbeton dagegen nicht von der

jeweils niedrigeren Festigkeit von entweder Gesteinskörnung oder Matrix bestimmt, sondern liegt im Bereich dazwischen. Simulationen zeigten jedoch eine Begrenzung der Betonfestigkeit auf die Festigkeit der leichten Gesteinskörnung, sofern diese einen Anteil von ≥ 40 Vol. – % der Betonzusammensetzung ausmacht. Für Anteile unter 40 Vol. – % werden demnach Betonfestigkeiten erreicht, die zwischen den Festigkeiten von Gesteinskörnung und Matrix liegen [6].

Ein hoher Volumenanteil leichter Gesteinskörnung im Beton reduziert die Betondichte und in der Folge sowohl die Druckfestigkeit als auch die Wärmeleitfähigkeit des Leichtbetons [127, 132]. Auch die Festigkeitsentwicklung wird von der Gesteinskörnung beeinflusst. Während bei Normalbetonen mit steigendem Betonalter ein Festigkeitszuwachs einhergeht, wird die Druckfestigkeit von Leichtbeton von der leichten Gesteinskörnung begrenzt. In der Folge ist die Festigkeitsentwicklung der Matrix für die Betonfestigkeit nicht von entscheidender Bedeutung, so dass Leichtbetone mit einem hohen Anteil an leichter Gesteinskörnung bereits nach wenigen Tagen nahezu ihre Endfestigkeit erreichen [6, 133].

Organische Leichtzuschläge

Mit einer geringen Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit ermöglichen Holzspäne die Herstellung von Leichtbetonen mit organischen Bestandteilen. Nach DIN EN ISO 10456 [76] ist für Nutzholz bei einer Rohdichte von 450 kg/m^3 ein Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $0,12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ anzusetzen. Zudem wirkt sich das im Holz über die Lebensdauer der Bauteile gespeicherte CO_2 positiv auf die Ökobilanz von Holzbeton aus [134, 135].

Die im Holz enthaltenen Zucker Cellulose, Lignin und Hemicellulose wirken hydrationsinhibierend. Im hochalkalischen Frischbeton gehen die Zucker in Lösung und verzögern das Erstarrungsverhalten, auch die Betonfestigkeit sinkt. Der Festigkeitsverlust wird von einem Luftporeneintrag durch im Holz enthaltene Harze und Fette zusätzlich verstärkt. Werden Holzspäne mit einer Ummantelung auf Zementbasis versehen, ist eine Verwendung als Leichtzuschlag möglich [9].

Aber auch bei der Verwendung ummantelter Holzspäne beeinflusst sowohl die Kornform als auch die, zwar reduzierte, Wasseraufnahme die Frisch- und Festbetoneigenschaften von Holzbeton. Während die Kornform bei gedrunenen Holzhackschnitzeln mit gebrochener Gesteinskörnung vergleichbar ist, weisen Holzspäne häufig einen hohen Kornindex, der das Verhältnis von Länge zu Breite beschreibt, auf. Bei der Verwendung mineralisch ummantelter Holzspäne geht Klatt [9] nach dem Prüfen des Frost-Tau-Widerstands, des Schimmelpilzwachstums und des Masseverlusts infolge Bewitterung im Vergleich mit unbehandelten Holzspänen von einer guten Dauerhaftigkeit von Leichtbetonen aus.

Alkalische Aktivierung

Da die Wärmeleitfähigkeit vieler Zusatzstoffe wie zuvor beschrieben unterhalb der von Zement liegt, ist die Betrachtung von Geopolymeren und alkalisch aktivierten Betonen in Hinblick auf die Wärmeleitfähigkeit durchaus interessant.

In [10] wird die Entwicklung eines sehr leichten alkalisch aktivierten Betons unter Verwendung von Flugasche, Hüttensand, Natriumhydroxid und Blähglas beschrieben. Bei einem Mischungsentwurf wird die Packungsdichte mithilfe des modifizierten Andreasen-Modells (vgl. Abschnitt 2.1.1) optimiert, bei einem zweiten nicht, da eine niedrige Packungsdichte zu einem erhöhten Porenvolumen führt, das wiederum die Wärmeleitfähigkeit reduziert. Damit wurde eine sehr niedrige Trockenrohddichte von 710 kg/m^3 erreicht, die Druckfestigkeit beträgt nach 28 Tagen 8 N/mm^2 bis 10 N/mm^2 , die Wärmeleitfähigkeit ist jedoch mit $0,153 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ bis $0,232 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ höher als bei den Betonen mit optimierter Packungsdichte. Für diese Betone wurde bei einer Trockenrohddichte von ca. 800 kg/m^3 eine Festigkeit von $9,7 \text{ N/mm}^2$ sowie eine Wärmeleitfähigkeit von $0,108 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ermittelt. Für einen Beton mit einer Druckfestigkeit von 8 N/mm^2 wurde eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit von $0,074 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ gemessen.

Allerdings liegt die Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Blähglases bei $0,07 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. Auch wenn der Ansatz vielversprechend ist, scheint fraglich, dass ein ausreichender Feststoffgehalt der Bindemittelmatrix zum Erreichen der genannten Festigkeiten ohne eine nennenswerte Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit einsetzbar ist.

3.2. Haufwerksporiger Leichtbeton

Klassisch haufwerksporige Leichtbetone enthalten einen geringen Anteil Zementleim und feiner Gesteinskörnung, wodurch Hohlräume zwischen der punktuell verbundenen groben Gesteinskörnung verbleiben [6, 136]. Ein Vorteil der Anwendung von haufwerksporigem Leichtbeton als Mauersteine [6] oder Fertigteilelemente [90] ist neben der niedrigen Wärmeleitfähigkeit die hohe schalldämmende Wirkung [137]. Aufgrund des geringen Zementleimgehalts sind haufwerksporige Leichtbetone von steifer Konsistenz, so dass Bauteile mit Walzen zu verdichten sind [88]. Mit der Kombination geringer Zementleimgehalte von 15 Vol. – %, 20 Vol. – % und 25 Vol. – % mit Diatomit, Bims oder rezykliertem Porenbeton als leichte Gesteinskörnung werden in [137] Wärmeleitfähigkeiten zwischen $0,16 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ und $0,25 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ mittels Wärmeflussmessung bestimmt. Bei Rohdichten zwischen 558 kg/m^3 und 775 kg/m^3 liegt die an Zylindern mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 200 mm ermittelte Druckfestigkeit zwischen $2,47 \text{ N/mm}^2$ und $5,99 \text{ N/mm}^2$. Dabei steigen Festigkeit, Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit mit steigendem Leimvolumen. Druckfestigkeit und

Wärmeleitfähigkeit eines dieser mit Diatomit hergestellten haufwerksporigen Leichtbetone sind in Tabelle 3.2 verschiedenen sehr leichten Leichtbetonen gegenübergestellt.

Bei vergleichbarer Trockenrohddichte werden mit solchen klassischen haufwerksporigen Leichtbetonen aus Zementleim und Blähton in [90] Druckfestigkeiten in der gleichen Größenordnung erreicht. Wird der geringe Zementleimgehalt erhöht und die hohe Porosität des Betons durch ein Porosieren der Matrix mit Luftporenbildnern sichergestellt, erfährt der Frischbeton eine Verflüssigung, die das Verdichten mit Rüttlern ermöglicht. Aufgrund des hohen Luftvolumens in der Stoffraumrechnung sind diese matrix- und kornporigen Leichtbetone nach [138] als haufwerksporige Leichtbetone zu betrachten. Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Warmbeton weist ebenfalls eine porosierte Matrix und einen hohen Luftporengehalt auf, der ihn nach dieser Einteilung mit einem haufwerksporigen Leichtbeton gleichsetzt.

Auch die mechanischen Eigenschaften werden mit der Verwendung einer aufgeschäumten Matrix verbessert, da die Haufwerksporen von der porosierten Matrix aufgefüllt werden. In der Folge verlaufen die Spannungen im Beton gleichmäßiger als bei einer punktuellen Verbindung der Gesteinskörnung, so dass bei gleichbleibender Rohddichte das Erzielen höherer Festigkeiten möglich ist. Eine weitere Verbesserung des Verhältnisses der Festigkeit zur Rohddichte ist möglich, sofern neben Blähton auch Blähglas als leichte Gesteinskörnung verwendet wird. Mit einer verringerten Rohddichte geht ebenfalls eine reduzierte Wärmeleitfähigkeit einher [90].

3.2.1. Mechanische Eigenschaften von haufwerksporigem Leichtbeton

In [139] werden auf der Basis von einigen tausend Messwerten rechnerische Zusammenhänge zwischen Druckfestigkeit, E-Modul, Trockenrohddichte und Biegezugfestigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton untersucht. Grundlage sowohl für die Rechenwerte als auch die Betonprüfungen bildet die dänische Norm DS434. Die Prüfabläufe zur Kennwertermittlung stimmen hierbei weitgehend mit den in der jüngeren DIN EN 1520 [12] vorgegebenen überein. Betrachtet werden Betone mit einer Rohddichte zwischen 500 kg/m^3 und 1800 kg/m^3 und Druckfestigkeiten zwischen 2 N/mm^2 und 30 N/mm^2 . Im Vergleich mit den Messwerten wird sowohl der E-Modul als auch die Biegezugfestigkeit der betrachteten Betone konservativ abgeschätzt, insbesondere für niedrige Trockenrohddichten unter 800 kg/m^3 . Die gemessenen und rechnerisch abgeschätzten Werte der Betone mit Rohddichten unterhalb 600 kg/m^3 bzw. mit Festigkeiten von maximal 5 N/mm^2 dienen in Abschnitt 7.1.3 als Vergleichswerte für den entwickelten Warmbeton.

Diese und weitere in [140] vorgestellte Untersuchungen trugen zur Grundlage der DIN EN 1520 [12] bei. Nach [140] sind haufwerksporige Leichtbetone mit einer Rohdichte über 1400 kg/m^3 mit gefügedichtem Leichtbeton vergleichbar und werden mit den Rechenwerten leicht konservativ bestimmt. Um der sehr konservativen Abschätzung haufwerksporiger Leichtbetone mit geringer Dichte Rechnung zu tragen, ist ein dichtebezogener Korrekturfaktor zur Berechnung des E-Moduls erforderlich. Der Mittelwert des E-Moduls E_{cm} lässt sich nach DIN EN 1520 [12] über die charakteristische Druckfestigkeit f_{ck} wie folgt abschätzen.

$$E_{\text{cm}} = 10000 \cdot f_{\text{ck}}^{1/3} \cdot \eta_2 \quad [\text{N/mm}^2]$$

Der Faktor η_2 ist dabei von der Betondichte abhängig.

$$\eta_2 = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2 \quad [-] \quad \text{für } \rho > 1400 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_2 = 0,64 \cdot \left(\frac{\rho}{2200}\right) \quad [-] \quad \text{für } \rho \leq 1400 \text{ kg/m}^3$$

In [138] werden ebenfalls die nach dieser Beziehung von Druckfestigkeit zu E-Modul abgeleiteten Rechenwerte mit Messwerten abgeglichen. Auch hier wird die konservative Abschätzung der Rechenwerte bestätigt. Insbesondere an Betonen mit geringer Dichte liegen die Messwerte deutlich über den berechneten Werten. In den Vergleich fließen zusätzlich haufwerksporige Betone mit porosierter Matrix ein. Deren Rechen- und Messwerte fügen sich in die Bandbreite der betrachteten Betone ein.

3.2.2. Abgrenzung gegenüber gefügedichtem Leichtbeton

Die Bemessung von haufwerksporigem Leichtbeton unterscheidet sich aufgrund der offenen Struktur von der Bemessung gefügedichteten Leichtbetons. Letztere orientiert sich an der Bemessung von Normalbeton. Während der Lastabtrag von gefügedichtem Leichtbeton mit geringen Trockenrohdsichten verhältnismäßig gleichmäßig über den Querschnitt erfolgt, werden Spannungen in haufwerksporigem Leichtbeton innerhalb des Korngerüsts weitergeleitet und dabei von Korn zu Korn umgelenkt [90]. Der gleichmäßigere Lastabtrag in gefügedichtem Leichtbeton und haufwerksporigem Leichtbeton mit porosierter Matrix führt zu einem verbesserten Verhältnis der Festigkeit zur Rohdichte. Der Mittelwert des E-Moduls von gefügedichtem Leichtbeton E_{lcm} lässt sich nach EC 2 [141] abschätzen. Der mittlere E-Modul von Normalbeton E_{cm} wird hierbei mit dem dichtebezogenen Beiwert η_E abgemindert.

$$E_{\text{lcm}} = E_{\text{cm}} \cdot \eta_E \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$E_{\text{cm}} = 22 \cdot \left(\frac{f_{\text{cm}}}{10}\right)^{0,3} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$f_{\text{cm}} = f_{\text{ck}} + 8 \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\eta_{\text{E}} = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2 \quad [-]$$

3.3. Monolithisch bauen mit Beton

Die aktuellen Bestrebungen, Warmbetone mit reduzierter Wärmeleitfähigkeit herzustellen, knüpfen an die Errichtung von Gebäuden mit monolithischen Wänden aus Leichtbeton an. Beispiele für den monolithischen Einsatz von Leichtbeton sind die 1965 errichtete Polar Sea Cathedral in Tromsø aus einem LC20/22 mit einer Rohdichte von 1650 kg/m^3 und das 1969 fertiggestellte One Shell Plaza in Houston mit einer Betonrohddichte von 1850 kg/m^3 [6]. Die Energiekrise in den 1970er-Jahren brachte jedoch eine Verschärfung der Anforderungen an die energetische Leistungsfähigkeit von Gebäudehüllen mit sich. Damit war ein monolithischer Einsatz von Leichtbeton trotz der vorangegangenen erfolgreichen Entwicklung und Anwendung vorerst nicht mehr möglich. Betontechnologische Weiterentwicklungen ermöglichten gegen Ende des letzten Jahrhunderts das Herstellen leichterer Leichtbetone mit geringer Wärmeleitfähigkeit [88].

Das 2002 in Chur (Schweiz) errichtete Haus Gartmann gehört zu den ersten Wohnhäusern mit monolithischem Wandaufbau dieser Generation. Der Leichtbeton mit einer Rohdichte von 1100 kg/m^3 enthält eine Mischung aus Blähton und Blähglas. Die Druckfestigkeit liegt bei 12 N/mm^2 , der E-Modul bei $12\,000 \text{ N/mm}^2$ und die Wärmeleitfähigkeit bei $0,32 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. Auch ohne Hydrophobierung liegt der Wasseraufnahmekoeffizient bei $0,23 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ bis $0,37 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$. Zur weiteren Verbesserung dieser zum damaligen Zeitpunkt sehr guten Festbetonkennwerte formulierte der Bauherr und Architekt das Ziel, zur Optimierung der wärmedämmenden Wirkung die Rohdichte weiter zu reduzieren. Des Weiteren empfahl er trotz der erfolgreichen Umsetzung im eigenen Haus zur Verringerung der Gefahr einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion den Verzicht auf Blähglas [7].

Das Referenzgebäude der EnEV 2014 schreibt einen Grenzwert von $U \leq 0,28 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ vor. Seit 2016 ist der Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes zusätzlich um 25 % zu reduzieren [3], woraus der maximal zulässige U-Wert nach [142] $0,21 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ beträgt. Die Energieeinsparverordnung schreibt jedoch nicht vor, dass die Einsparung mit jedem einzelnen Bauteil der Gebäudehülle zu erreichen ist, so dass eine Außenwand mit einem U-Wert von $0,28 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ nach wie vor zulässig ist [3].

3.4. Vom Leichtbeton zum Infraleichtbeton

Der Zusammenhang zwischen Trockenrohddichte und Druckfestigkeit bzw. Wärmeleitfähigkeit ist durch zahlreiche Untersuchungen belegt [6, 92, 127, 143]. Entsprechend naheliegend ist die Überlegung, sehr leichte Betone zu entwickeln, um die Wärmeleitfähigkeit weiter zu reduzieren, so dass die in DIN EN 206-1 [33] für Leichtbeton festgelegte Untergrenze von 800 kg/m^3 unterschritten wird. Nach [112] sind die untersuchten zementgebundenen Schäume in dieser Form aufgrund der geringen Festigkeiten nur als zusätzliche Wärmedämmschicht einsetzbar, können jedoch in Kombination mit Blähglas als Grundlage für die Weiterentwicklung von Infraleichtbetonen dienen. Diese Kombination verspricht geringe Rohdichten bei definierten Festigkeitseigenschaften und ist mit den haufwerksporigen Leichtbetonen mit porosierter Matrix nach [90] gleichzusetzen.

Nach den Technischen Regeln zu DIN EN 1520:2003 [144] waren Leichtbetone mit porosierter Matrix jedoch per Definition nicht mit haufwerksporigem Leichtbeton gleichzusetzen. Auch der Beiwert η_2 zur Berücksichtigung der geringen Betondichte war in Deutschland abweichend von DIN EN 1520 [12] auf die hier geregelte Ermittlung für $\rho > 1400 \text{ kg/m}^3$ festgelegt. Seit dem 02.01.2013 sind diese von der DIN EN 1520:2011 [12] abweichenden Bestimmungen jedoch nicht mehr gültig. Folglich ist es möglich, die Güte einer Übertragung der für haufwerksporigen Leichtbeton bekannten Zusammenhänge von Rohddichte, Druckfestigkeit und E-Modul auf Infraleichtbetone zu untersuchen. Ist die Beschreibung solcher sehr leichten Leichtbetone mit den bekannten Zusammenhängen möglich, ist dennoch zu beachten, dass DIN EN 1520 [12] ausschließlich für die Herstellung von Fertigteilen und nicht für Ortbeton gilt.

Ein zweiter Ansatzpunkt zur Beschreibung von Infraleichtbetonen ist das Extrapolieren der für Normalbeton und gefügedichten Leichtbeton mit Rohdichten über 800 kg/m^3 bekannten Regeln. Die Auswirkung sehr geringer Betondichten ist hierbei noch näher zu untersuchen. Die Gültigkeit beider Vorgehensweisen für Infraleichtbetone mit porosierter Matrix ist derzeit ungeklärt.

Auf der Basis einer packungsdichteoptimierten Mischungsentwicklung erreichte [22] eine solche Kombination von ausreichender Festigkeit für den konstruktiven Einsatz bei gleichzeitig sehr niedriger Wärmeleitfähigkeit. Mittels modifiziertem Andreasen-Modell (vgl. 2.1.1) wurde die Packungsdichte der Betone sieblinienbasiert optimiert. Als leichte Gesteinskörnung wurde Blähglas verwendet, die Matrix wurde zusätzlich mit Luftporenbildner porosiert. Während der Mischungsentwicklung wurden Verarbeitbarkeit, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Zementart und -gehalt sowie der Verwendung von Zusatzstoffen betrachtet. Die Trockenrohddichte der so gefundenen Zusammensetzung liegt bei 600 kg/m^3 bis 750 kg/m^3 , die an Würfeln mit

einer Kantenlänge von 10 cm ermittelte Druckfestigkeit nach 28 Tagen bei 10 N/mm^2 bis 12 N/mm^2 . Die mittels Wärmeflussmessung bestimmte Wärmeleitfähigkeit liegt bei nur $0,12 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. Die hierfür angegebene Messdauer von 8–16 Minuten entspricht ungefähr der Dauer einer Messung mit dem Heizbrückenverfahren, das in Abschnitt 4.2.6 beschrieben ist.

Im Oktober 2015 wurde in Tilburg (Niederlande) eine Probewand mit einem, ebenso wie dem in [22] zuvor beschriebenen, an der TU Eindhoven entwickelten Warmbeton hergestellt. Im Produktionsmischer gelang eine Verflüssigung des Bindemittels jedoch nur mithilfe einer erhöhten Wasserzugabe, wodurch es zum Aufschwimmen des Blähglases kam. Der Beton entsprach der Konsistenzklasse S3 bzw. F2, an Probekörpern wurden nach 7 und 28 Tagen Druckfestigkeiten von 7 N/mm^2 bzw. 10 N/mm^2 gemessen [145]. Die Trockenrohddichte wurde am IWB der Universität Stuttgart mit $\rho = 752 \text{ kg/m}^3$ ermittelt, ebenso wie die Wärmeleitfähigkeit im Heizbrückenverfahren mit $\lambda = 0,180 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ (vgl. Abschnitt 4.2.6). Druckfestigkeit und Trockenrohddichte liegen im Bereich der im Labor ermittelten Werte, wohingegen die Wärmeleitfähigkeit herstellbedingt um 50 % gestiegen ist.

Mit der Verwendung eines hohen Blähglasgehalts gelang [91] ebenfalls die Entwicklung eines Infraleichtbetons mit einer Trockenrohddichte von 750 kg/m^3 . Um trotz der niedrigen Dichte eine ausreichende Festigkeit zu erzielen, enthält der Beton neben dem Blähglas einen Portlandzement der Festigkeitsklasse 52,5 R sowie PP-Fasern. Zusätzlich wurde die Packungsdichte der Feststoffe mithilfe des modifizierten Andreasen-Modells optimiert. Der Frischbeton ist von plastischer Konsistenz (F2 bzw. S3), die an Würfeln mit einer Kantenlänge von 15 cm gemessene Druckfestigkeit liegt nach 28 Tagen je nach Fasergehalt bei $10,5 \text{ N/mm}^2$ bis 15 N/mm^2 . Die mit einer Wärmeflussmessung mit einer Messdauer von ca. 15 Minuten ermittelte Wärmeleitfähigkeit beträgt $0,160 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ bis $0,171 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. Höhere Fasergehalte von etwa 1,2 Vol. – % führen hierbei zu höheren Druckfestigkeiten. Da Blähglas aus Altglas hergestellt wird, wird dessen Verwendung zudem als nachhaltig angesehen.

Nach [146] führt die Verwendung von Aerogelen zu einer deutlichen Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu konventionellen Leichtbetonen. Aerogele bestehen zu großen Teilen aus Luft, die von einem festen Traggerüst mit einer entsprechend hohen spezifischen inneren Oberfläche umgeben ist. Die Struktur der Gele ist offenporig mit Porengrößen überwiegend im Mesoporenbereich (2 nm bis 50 nm). Die Dichte der in [146, 147] und in eigenen Versuchen verwendeten Aerogele auf Silikabasis liegt in der Regel bei 100 kg/m^3 (zwischen 3 kg/m^3 und 500 kg/m^3) und die Wärmeleitfähigkeit beträgt lediglich $0,017 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ bis $0,021 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ [148].

Bei der Entwicklung von Aerogelbeton ersetzt Aerogelgranulat die leichte Gesteinskörnung. Die sehr geringe Dichte von Aerogelgranulat führt dazu, dass der Lastabtrag

ausschließlich über den Zementstein erfolgt. In [146] wurde entsprechend eine hochfeste Matrix mit optimierter Packungsdichte gewählt, um mit einem hohen Aerogelgehalt von 65 Vol. – % einen Infraleichtbeton mit einer Trockenrohddichte von 670 kg/m^3 und ausreichender Festigkeit zu entwickeln. Sowohl die an Prismen mit der Abmessung $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ bestimmte Druckfestigkeit mit etwa $2,5 \text{ N/mm}^2$ nach 28 Tagen als auch der an Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm ermittelte E-Modul mit 1100 N/mm^2 sind jedoch deutlich niedriger als für andere Betone mit vergleichbarer Dichte. Durch das Austauschen des Zements war eine Verdopplung der Druckfestigkeit möglich. Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{tr,10}$ wurde an einem Probekörper mit einer Trockenrohddichte von 570 kg/m^3 ermittelt und beträgt $0,099 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. Im Vergleich mit Porenbeton ist durch den Einsatz von Aerogelgranulat demnach eine Reduktion der Wärmeleitfähigkeit um bis zu 40 % möglich.

Untersuchungen an der Universität Duisburg-Essen zeigten, dass Dichte und Druckfestigkeit zwar mit dem enthaltenen Aerogelvolumen zusammenhängen, die Matrixfestigkeit bei gleichem Aerogelgehalt jedoch die Betonfestigkeit bestimmt. Entsprechend wurde für die Entwicklung eines Hochleistungs-aerogelbetons ebenfalls eine Kombination aus ultrahochfestem Beton und Aerogelgranulat gewählt. Ein Großteil der untersuchten Betonzusammensetzungen ist über die Trockenrohddichte als Leichtbeton einzuordnen. Erst bei einem Aerogelgehalt von mindestens 64 Vol. – % sinkt die Dichte auf unter 800 kg/m^3 . Bei einem Aerogelgehalt von 68,3 Vol. – % und einer Trockenrohddichte von 560 kg/m^3 beträgt die Würfeldruckfestigkeit $2,4 \text{ N/mm}^2$ (Kantenlänge 15 cm), der am Zylinder gemessene E-Modul 2008 N/mm^2 (15 cm Durchmesser und 30 cm Höhe) und die mittels Plattenverfahren bestimmte Wärmeleitfähigkeit $0,09 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ [147]. Dieser Aerogelinfraleichtbeton weist damit vergleichbare Eigenschaften auf wie der zuvor vorgestellte in [146] und wird lediglich zur Ausbildung einer Dämmschicht empfohlen. Ein verbessertes Verhältnis von Druckfestigkeit zu Trockenrohddichte und damit von Druckfestigkeit zu Wärmeleitfähigkeit wird für Rohdichten $\geq 600 \text{ kg/m}^3$ erreicht. Zur Reduzierung der erforderlichen Wandstärke auf 26 cm wird dennoch ein gradiertes Wandaufbau mit einer tragenden und einer dämmenden Schale sowie eines beidseitig aufgetragenen Aerogeldämmputzes empfohlen [147].

An der TU Kaiserslautern wurde ein selbstverdichtender Infraleichtbeton entwickelt und die Übertragbarkeit aus dem Labor auf die Baustelle anhand eines eingeschossigen Experimentalgebäudes mit einer Grundfläche von 7 m auf 5 m auf dem Campus überprüft. Der Beton enthält neben einem Hochofenzement, Blähglas und Wasser Zusatzmittel zum Verflüssigen, Stabilisieren und Hydrophobieren, sowie Schwindreduzierer und Schaumbildner. Bei der Herstellung im Tellermischer trat zunächst Kornbruch der groben Blähglaspartikel auf, was mit der Verwendung geeigneter Mischwerkzeuge zu verhindern ist. Die Frischbetondichte liegt bei 740 kg/m^3 , in 50 cm dicken Wänden führt die Hydra-

tationswärme zu Temperaturen von rund 70 °C. Bei einer Trockenrohddichte zwischen 650 kg/m³ und 700 kg/m³ erreicht der Beton nach 7, 28 und 90 Tagen die Druckfestigkeit von 3,7 N/mm², 6,3 N/mm² und 9,2 N/mm², nach 28 Tagen wurde der E-Modul mit 3500 N/mm² ermittelt. Das Schwindmaß nach 6 Monaten wurde durch den Schwindreduzierer von ca. 1,4 mm/m bis 1,6 mm/m auf ca. 0,7 mm/m deutlich gesenkt. Bei der Herstellung im Labor betrug der Messwert der Wärmeleitfähigkeit 0,15 W/(m · K). Messungen an Probekörpern, die unter Baustellenbedingungen hergestellt wurden, ergaben eine Wärmeleitfähigkeit von 0,16 W/(m · K). Da die Wärmeleitfähigkeit im Gebäude maßgeblich vom Feuchtegehalt der Wand beeinflusst wird wurde der Wasseraufnahmekoeffizient ermittelt, der den Beton durch die Verwendung des Hydrophobierungsmittels mit $W_w < 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ als wasserabweisend einstuft. Da die hohe Porosität einen schnellen Carbonatisierungsfortschritt erwarten lässt, wurde verzinkte Bewehrung eingebaut um das Auftreten von Korrosion zu verhindern. Der Beton für das Experimentalgebäude wurde nicht an der TU Kaiserslautern, sondern im Transportbetonwerk hergestellt. Der Zementleim wurde in einem Tellermischer hergestellt, im Fahrmischer mit dem Blähglas vermischt und über Betonkübel in die Schalung eingebracht. Einbetonierte Sensoren zeigen, dass Niederschlagsereignisse den Feuchtegehalt der monolithischen Wand lediglich bis etwa 20 mm Abstand zur Oberfläche beeinflussen. Folglich bleibt die ermittelte Wärmeleitfähigkeit fast über den gesamten Wandquerschnitt wirksam [32].

3.4.1. Schwindverhalten

Das Endschwindmaß von Leichtbeton liegt aufgrund der weicheren Gesteinskörnung in der Regel höher als das von Normalbeton, die Verzerrungen werden aber bei wassergesättigter leichter Gesteinskörnung zunächst verzögert. Wird viel Wasser aus der Gesteinskörnung an die Matrix abgegeben, ist anfangs auch Quellen möglich, bevor der Schwindvorgang einsetzt [6]. An Aerogelleichtbeton wurden bereits nach 126 Tagen sehr hohe Schwindmaße von 2,2 mm/m gemessen, die noch nicht dem Endschwindmaß entsprechen. Diese hohen Verformungen werden darauf zurückgeführt, dass die Bildung eines stabilisierenden Korngefüges weder mit Zement noch mit dem enthaltenen Aerogelgranulat möglich ist [146]. Das in Infraleichtbeton enthaltene Korngerüst führt in [5, 14] zu dem im Vergleich zum Aerogelleichtbeton geringeren Endschwindmaß von 0,9 mm/m.

3.4.2. Verbundverhalten

Die Verbundfestigkeit wird von der Druckfestigkeit, dem Wasser-Bindemittel-Verhältnis des Betons und der Ausrichtung der Bewehrung während der Verarbeitung beeinflusst. Insbesondere bei hohen w/z-Werten sammelt sich Luft und Wasser unter horizontal

eingebauter Bewehrung, wodurch der Verbund geschwächt wird. Das spröde Materialverhalten von Leichtbeton führt in Auszugsversuchen zu einem Verbundversagen bei geringem Schlupf. Aber auch Form, Material, Durchmesser und Verbundlänge von Bewehrungsstäben wirken sich auf die Verbundfestigkeit aus. So ist an geripptem Stahl mit geringem Stabdurchmesser und kurzer Verbundlänge die höchste Verbundspannung messbar [149].

Um die Materialsprödhheit sehr leichter Leichtbetone abzubilden, schlägt Hückler [150] auf experimenteller Grundlage ein angepasstes Modell mit einem linearen Anstieg mit einer Steigung von $1/10$ bis zum Höchstwert für die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung von Infraleichtbeton vor [150]. Demnach beträgt der bei der maximalen Verbundspannung auftretende Schlupf 10% der Spannung. Der anschließende Abfall der Verbundspannung erfolgt ebenfalls linear mit einer deutlich geringeren Steigung und setzt sich, in Abhängigkeit von Stabdurchmesser und Rippenabstand, bis zur konstanten Reibverbundspannung fort. Das Verbundmodell nach Hückler ist in Abbildung 3.2 für eine Betonfestigkeit von 5 N/mm^2 dargestellt.

Das Verbundverhalten von Aerogelleichtbetonen mit ihren geringen Druckfestigkeiten wurde in [146, 147] ebenfalls untersucht. In Auszugsversuchen mit Stabstahl mit einem Durchmesser von 8 mm wurde für Aerogelleichtbeton die maximale Verbundspannung von $0,95 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Da die Verbundwirkung über Haftung erzielt wurde, werden für diesen Beton zusätzliche Verankerungen wie eine Kopfplatte empfohlen [146]. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Betonstahl mit $\lambda = 60 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, die der sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit des entwickelten Aerogelhochleistungsbetons entgegensteht, wurde die Verbundspannung in [147] an GFK-Stäben in Anlehnung an [151] ermittelt. An drei verschiedenen Betonzusammensetzungen wurde die Verbundspannung jeweils an Stäben $\text{Ø}12 \text{ mm}$ und $\text{Ø}16 \text{ mm}$ mit einer Belastungsgeschwindigkeit

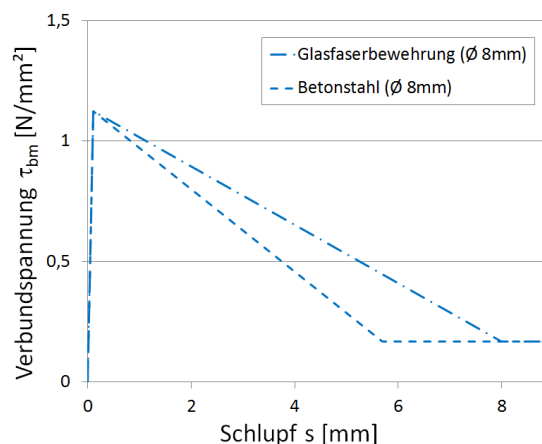


Abbildung 3.2.: Verbundmodell für Infraleichtbeton mit einer Betonfestigkeit von 5 N/mm^2 nach Hückler [150]

von 0,3 mm/m in Abhängigkeit der Betonfestigkeit bestimmt. Bei der Prüfung wurde sowohl Haft- als auch Scherverbund aktiviert und der Zusammenhang zwischen Verbundspannung und Druckfestigkeit mit $\tau_{\max,m} = 0,38 \cdot f_{\text{lcm,cube150}}^{0,82}$ beschrieben. Die Verbundspannung von Aerogelbeton liegt damit unterhalb der von Leichtbeton, aber oberhalb der in [5] für Infraleichtbeton ermittelten.

3.4.3. Thermische Eigenschaften

Bei der Entwicklung sehr leichter Betone wird häufig die Wärmeleitfähigkeit ermittelt, die als Eingangsgröße für die Berechnung des U-Werts die Wandstärke bestimmt. Der Wärmeschutz einer Wand wird jedoch nur unter stationären Temperaturverhältnissen auf beiden Seiten ausschließlich von der Wärmeleitfähigkeit bestimmt [69]. Weitere Kennwerte, die die thermischen Eigenschaften eines Materials beschreiben, sind neben der spezifischen Wärmekapazität c_p die Effusivität ε und die Diffusivität α .

Die spezifische Wärmekapazität gibt an, wie viel Wärmeenergie ein Stoff speichern kann, wenn 1 kg des Stoffes um 1 Kelvin erwärmt wird. Zur Beschreibung von Effusivität und Diffusivität lassen sich Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Rohdichte zusammenfassen [83, 69].

Die Effusivität $\varepsilon = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p}$ beschreibt die Geschwindigkeit, mit der ein Stoff Wärme aus der Umgebung aufnimmt, weshalb sie auch als Wärmeeindringkoeffizient bezeichnet wird. Ist sie hoch, erfolgt an der Oberfläche ein hoher Wärmefluss in das Bauteil hinein, um ein Gleichgewicht mit der Umgebung zu erreichen. Daraus resultiert ein berührungskaltes Material [4, 83] wie Stahl, vgl. Tabelle 3.1.

Zur Beschreibung einer Temperaturwelle in einem Stoff wird die Diffusivität oder Temperaturleitzahl $\alpha = \lambda / (\rho \cdot c_p)$ verwendet. Eine hohe Diffusivität bewirkt eine schnelle Temperaturänderung im Bauteil [83, 69].

Die in Tabelle 3.1 zusammengefassten Materialkennwerte zeigen hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte und Effusivität deutliche Unterschiede zwischen Normalbeton und Infraleichtbeton. Die geringe Dichte des Infraleichtbetons führt sowohl zu einer

Tabelle 3.1.: Materialeigenschaften von Beton, Wärmedämmmaterial und Stahl im Vergleich

	Beton [4]	Infraleicht- beton [4]	Wärmedämm- material [4]	Stahl [83]
Wärmeleitfähigkeit [W/(m · K)]	2,1	0,14	0,04	60
Rohdichte [kg/m ³]	2400	800	20	7800
Spez. Wärmekapazität [J/(kg · K)]	850	870	840	450
Diffusivität [mm ² /s]	0,97	0,20	2,37	14
Effusivität [J/(K · m ² · s ^{0,5})]	2019	312	26	13000

niedrigen Wärmeleitfähigkeit als auch zu einer langsamen Wärmeaufnahme bzw. -abgabe über die Oberfläche. Spezifische Wärmekapazität und Diffusivität liegen jedoch in der gleichen Größenordnung. Die langsame Abgabe von im Bauteil gespeicherter Wärmeenergie bzw. von durch das Bauteil durchdringende Wärme führt in Gebäuden zu einem hohen thermischen Komfort. Die Kennwerte von Wärmedämmmaterial und Stahl geben die Größenordnung für wärmedämmende und temperaturleitende Stoffe an, deren Werte von Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Effusivität deutlich niedriger bzw. höher sind.

3.5. Infraleichtbeton im Wohnbau

Ein im Juli 2007 fertiggestelltes Wohnhaus in Berlin ist das erste Gebäude, das mit monolithischen Wänden aus Infraleichtbeton geplant und umgesetzt wurde. Der am Institut für Werkstoffe des Bauwesens der UniBwM entwickelte und an der TU Berlin optimierte Beton enthält neben Zement und Wasser lediglich die für die Reduzierung der Dichte erforderlichen Bestandteile Blähton und Luftporenbildner. Bei einer Trockenrohddichte von 760 kg/m^3 wird nach 28 Tagen die Druckfestigkeit von $7,0 \text{ N/mm}^2$ erreicht, der Elastizitätsmodul liegt bei 4000 N/mm^2 . Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{tr,10}$ beträgt $0,181 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, der Wärmedurchgangskoeffizient einer 50 cm dicken Wand damit $0,341 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$. Die Wände wurden nach 7 Tagen ausgeschalt und im Folgenden durch Kunststoffplanen vor dem Austrocknen geschützt. An der Außenseite der Wand war ein Nachbessern von Lunkern und von stellenweise mit der Schalung gelöstem Zementleim erforderlich. Zusätzlich wurde eine Hydrophobierung aufgebracht [5].

Für ein 2015 in Aiterbach errichtetes Wohnhaus wurde im Betonlabor von Heidelberger Beton München gemeinsam mit der UniBwM ein leistungsstärkerer Leichtbeton entwickelt. Bei annähernd gleicher Dichte und Wärmeleitfähigkeit weist der Beton deutlich höhere Festigkeiten auf. Die Eigenschaften des Hochleistungsleichtbetons wurden an Probewänden überprüft, um die Übertragbarkeit auf die Baustelle sicherzustellen. Der Beton enthält neben Zement, Flugasche und Silika eine Mischung aus Blähglas und Blähton. Der Frischbeton ist über den Zeitraum von einer Stunde nach Mischbeginn selbstverdichtend und auch infolge des anschließenden Ansteifens 90 Minuten nach Mischbeginn mit einer weichen Konsistenz weiterhin gut verarbeitbar. Bei einer mittleren Trockenrohddichte von 750 kg/m^3 wird nach 28 Tagen die Druckfestigkeit von $14,2 \text{ N/mm}^2$ erreicht, wobei Schwankungen der Messwerte auf die Rohddichte der Probekörper zurückzuführen sind. Der E-Modul beträgt im Alter von 28 Tagen 5237 N/mm^2 und nach einem Jahr 5598 N/mm^2 . Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{tr,10}$ liegt bei $0,185 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. Die niedrige Wärmeleitfähigkeit führt trotz der enthaltenen puzzolanischen Zusatzstoffe zu einer hohen Hydratationswärme von $88 \text{ }^\circ\text{C}$ im Kern einer 50 cm

dicken Wand. Dieser kritischen Temperaturentwicklung wurde entgegengewirkt, indem ein Teil des Anmachwassers durch Scherbeneis ersetzt wurde [14].

3.5.1. Schwind- und Kriechverhalten

Das Endschwindmaß der in Abschnitt 3.5 vorgestellten Infraleichtbetone beträgt 0,9 mm/m [5, 14]. Während in [5] nach knapp 200 Tagen bei einer Belastung mit 30 % der Druckfestigkeit eine Kriechverzerrung von 3,75 mm/m und von 5 mm/m bei einer Belastung mit 50 % der Druckfestigkeit gemessen wurde, liegt die Gesamtverzerrung des Betons in [14] nach 456 Tagen mit einem spezifischen Kriechmaß von $0,18 \text{ (mm/m) / (N/mm}^2\text{)}$ bei nur 1,94 mm/m.

3.5.2. Verbundverhalten

In [5] wurde die Verbundspannung mittels Auszugversuchen mit GFK- und Stahlstäben mit einem Durchmesser von 12 mm bestimmt. Dabei betrug die Verbundspannung zwischen Infraleichtbeton und Glasfaserstäben $0,87 \text{ N/mm}^2$, die mit Betonstahl ermittelte Verbundspannung $1,04 \text{ N/mm}^2$. Die höhere Verbundspannung bei der Verwendung von Stahl wird auf die Stabgeometrie zurückgeführt. Die Zahl der Rippen im Stahlstab ist höher als die Zahl der Kerben im Glasfaserstab, wodurch der auf Druck beanspruchte Bereich des Betons vergrößert wird.

3.6. Maßstabseinfluss auf die Betoneigenschaften

Bei der Entwicklung sehr leichter Betone liegt der Fokus in der Regel auf Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit. In Abschnitt 3.4 sind vielversprechende Ansätze zusammengefasst, beispielsweise die Verwendung von Aerogelen, mit denen ein Aerogelleichtbeton mit einer Wärmeleitfähigkeit von lediglich $\lambda = 0,09 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ hergestellt werden konnte. Ein Großteil dieser Ansätze beschreibt jedoch Konzepte und Versuche im Labormaßstab, ist also nach [152] in die Entwicklungsstufen 3 und 4 von 9 einzustufen. Die geringere Volumenstabilität und erhöhte Entmischungsneigung von Leichtbeton (vgl. Abschnitt 3.1.3) vergrößert den Maßstabseinfluss auf die Betoneigenschaften. Die Übertragbarkeit solcher Betone in die Produktionsumgebung ist entsprechend sorgfältig zu prüfen, um die erforderlichen Betoneigenschaften zu erreichen.

Ein in Tabelle 3.2 dargestellter Vergleich verschiedener Infraleichtbetone hinsichtlich Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit zeigt, dass insbesondere die Wärmeleitfähigkeit mit vorangeschrittener Entwicklungsstufe ansteigt. Mögliche Ursachen dafür sind zum einen mangelhafte Anpassung an den Produktionsmischer wie im Fall der Entwicklung

an der TU Eindhoven [22], durch die die Wärmeleitfähigkeit bei der Herstellung einer Probewand [145] von $0,12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ auf $0,18 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ anstieg. Daneben ist das Einbringen in die Schalung und Verdichten des Betons bei größeren Wandelementen und ggf. längeren Transportwegen weitaus zeitintensiver als im Labor. Verändern sich Konsistenz und Luftporengehalt während der Verarbeitungsdauer, ist ebenfalls mit veränderten Festbetoneigenschaften zu rechnen. So wurde für die Wärmeleitfähigkeit in [32] an unter Baustellenbedingungen hergestellten Probekörpern ein geringfügig höherer Wert von $0,16 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ gemessen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, inwiefern der Maßstabseinfluss durch eine gezielte Mischungszusammensetzung sowie Anpassungen des Mischregimes reduziert werden kann, um die Übertragbarkeit vom Labor- in den Realmaßstab mit möglichst geringer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit sicherzustellen.

Tabelle 3.2.: Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Infralichtbeton

		Druckfestigkeit		Wärmeleitfähigkeit		Entwicklungsstufe [–]
		[N/mm ²]	Probekörpergeometrie	[W/(m · K)]	Messverfahren	
Infralichtbeton	[32]	6,3	(150 × 150 × 150) mm ³	0,15	Plattenverfahren	4
	[32]	6,3	(150 × 150 × 150) mm ³	0,16	Plattenverfahren	7
	[22]	10–12	(100 × 100 × 100) mm ³	0,12	Wärmeflussmessung	4
	[5]	7,0	(150 × 150 × 150) mm ³	0,181	Plattenverfahren	9
	[14]	14,2	(150 × 150 × 150) mm ³	0,185	Plattenverfahren	9
Infralicht- geopolymer	[10]	9,7	(100 × 100 × 100) mm ³	0,108	Wärmeflussmessung	3
Aerogel- leichtbeton	[146]	2,5	(40 × 40 × 160) mm ³	0,099	Plattenverfahren	3
	[147]	2,4	(150 × 150 × 150) mm ³	0,09	Plattenverfahren	4
Haufwerksporiger Leichtbeton	[137]	3,2	Ø 100 mm × 200 mm	0,16	Wärmeflussmessung	4

4. Ausgangsstoffe und Untersuchungsmethoden

Auf die Beschreibung der Untersuchungsmethoden zur Ermittlung der Frisch- und Festbetoneigenschaften des zu entwickelnden Warmbetons folgt als Grundlage für die Mischungsentwicklung eine Betrachtung möglicher Ausgangsstoffe hinsichtlich des jeweiligen Einflusses auf Wärmeleitfähigkeit, Verarbeitbarkeit und Festigkeitsentwicklung.

Darauf aufbauend werden geeignete Bestandteile gewählt und zu Kombinationen mit hoher Packungsdichte zusammengesetzt. Dabei wird in Charakterisierungsversuchen der Feststoffe neben dem Wasseranspruch auch der Fließmittelbedarf des Bindemittels bestimmt, so dass die Kompatibilität bzw. Inkompatibilität von Bindemittel und Zusatzmitteln frühzeitig erkannt wird.

Da die gewünschte sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit nur mit einem hohen Anteil an Blähglas und Luftporen sowie einem geringen Zementgehalt zu erreichen ist, wird der Einfluss der Zusammensetzung auf Verarbeitbarkeit, Erstarrungsdauer und Betonfestigkeit im Labormaßstab abgeschätzt.

Im Rahmen dieser Versuche, bei denen die Herstellung in einem Eirich-Intensivmischer mit einem Nennvolumen von 10l erfolgt, wird ebenfalls die Verdichtbarkeit und Oberflächenqualität der Betone betrachtet. Die Ermittlung der Frisch- und Festbetoneigenschaften der gewählten Mischungszusammensetzung erfolgt im nächsten Entwicklungsschritt. In einem Suspensions- und einem Einwellenmischer werden in einem zweistufigen Mischregime 50l bis 100l Beton gemischt und über Zusatzmittel die gewünschte Verarbeitbarkeitsdauer eingestellt, sowie erste Probewandelemente hergestellt.

Abschließend wird die Übertragbarkeit auf eine Suspensionsmischanlage mit einem Mischervolumen von $0,8\text{ m}^3$ und zusätzlichem Vorratsbehälter mit einem Volumen von $1,6\text{ m}^3$ überprüft. Diese Suspensionsmischanlage ermöglicht die Herstellung von Bindemittelleim im Realmaßstab. Das vorhandene Volumen ist ausreichend, um einen Fahrmischer zu befüllen, in dem das Blähglas während der Fahrt zur Baustelle untergemischt wird.

4.1. Voraussetzungen für die Übertragbarkeit in den Realmaßstab

Neben der Packungsdichte wird bei der Zusammensetzung des Bindemittels die Hydratationswärmeentwicklung mittels Messungen in einem Betonkalorimeter betrachtet, um sowohl Rissbildung durch hohe Temperaturen im jungen Beton zu vermeiden, als auch das Erstarrungsverhalten und damit die erforderliche Standzeit der Schalung zu überprüfen. Die Kenntnis von Hydratationswärmeentwicklung und Erstarrungsverhalten ist grundlegend für eine erfolgreiche Übertragung der durchgeführten Mischungsentwicklung in den Realmaßstab. Des Weiteren sind der Einfluss aus Mischertyp und -größe für die Wahl eines geeigneten Mischregimes, sowie bereits im Labormaßstab das Betrachten einer ausreichend langen Verarbeitbarkeitsdauer erforderlich.

4.2. Kennwertermittlung

Der entwickelte Warmbeton wurde in Bezug auf die Konsistenzentwicklung während der Verarbeitbarkeitsdauer und auf das Erstarrungsverhalten untersucht. Am Festbeton wurde neben Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Schwind- und Kriechverhalten auch die Porengrößenverteilung und ihr Einfluss auf die Dauerhaftigkeit betrachtet. Tabelle 4.1 gibt eine Übersicht über die untersuchten Betoneigenschaften.

Sämtliche Kennwerte des Warmbetons wurden an Probekörpern ermittelt, die im zwei-stufigen Mischverfahren im Suspensions- und Einwellenmischer hergestellt wurden. Nach der Übertragung auf die Suspensionsmischanlage wurden Konsistenz, Luftporengehalt, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit vergleichend ermittelt.

4.2.1. Ermittlung des Erstarrungsverhaltens

Die Hydratationswärme von Zement ist nach DIN CEN/TR 16632 [153] mithilfe isothermer Wärmeflusskalorimetrie messbar. Für diese Messungen wurde das Kalorimeter I-Cal 2000 HPC von Calmetrix verwendet. Das Volumen von 150 ml der Messzellen ermöglicht Messungen an Beton bei Temperaturen zwischen 5 °C und 40 °C. Der Warmbeton enthält Hochofenzement, calcinierten Ton, Mikrosilika und Blähglas. Die Bindemittel wurden in Kombination mit den verwendeten Zusatzmitteln bei einer Temperatur von 20 °C betrachtet. Zunächst wurde eine Messung am Zement durchgeführt, die Wärmeentwicklung des calcinierten Tons sowie des verwendeten Mikrosilikas wurden jeweils in einer Abmischung mit dem Zement sowie einzeln in einer alkalischen Lösung untersucht. Das Mischungsverhältnis von Zement und calciniertem Ton bzw. Silika entspricht dabei

Tabelle 4.1.: Übersicht der durchgeführten Versuche zur Ermittlung der Betoneigenschaften

	Kennwert	Prüfmethode/-vorschrift
Frischbeton	Konsistenz	Verdichtungsmaß nach DIN EN 206-1 [33]
	LP-Gehalt	Druckausgleichsverfahren (LP-Topf) nach DIN EN 12350-7 [154]
Erstarrungsverhalten	Hydratationswärmeentwicklung und Erstarrungsende	Wärmeflusskalorimetrie nach DIN EN/TR 16632 [153]
Festbeton	Würfeldruckfestigkeit	DIN EN 12390-3 [155]
	E-Modul	DIN EN 12390-13 [156]
	Verbundfestigkeit	Ausziehversuche nach RILEM RC 6 [151]
	Schwindmaß	Schwindrinnen
	Kriechmaß	nach DAfStb-Heft 422 [157]
	Porengrößenverteilung	Quecksilberdruckporosimetrie nach DIN 66133 [158] und optisch
	Sorptionsisotherme	Dynamische Wasserdampfsorption nach DIN EN ISO 12571 [64]
Wärmeleitfähigkeit	Heizbrückenverfahren, analog zum Heißdrahtverfahren nach DIN EN 993-15 [159] und Plattenverfahren nach DIN EN 12664 [160]	
Dauerhaftigkeit	Carbonatisierungsfortschritt	Farbumschlag mit Phenolphthaleinlösung
	Frost-Tau-Widerstand	Plattenverfahren nach DIN CEN/TS 12390-9 [161]
	Wasseraufnahmekoeffizient	Teilweises Eintauchen von Probekörpern nach DIN EN ISO 15148 [162]
Ökobilanz	Bilanzierung auf Bauteilebene	DIN EN ISO 14040 [85]

dem des Betons. Für die Messungen mit Zement wurde der Wasserbindemittelwert konstant gehalten, was im Fall des reinen Zementleims zu einer erhöhten Verflüssigung aufgrund des geringeren Feinstgehaltes führt. Für die Messungen von calciniertem Tonmehl sowie Silika in der alkalischen Lösung war entsprechend ein erhöhter Wasserbindemittelwert für eine ausreichende Verflüssigung erforderlich. Für die Messung der einzelnen Ausgangsstoffe wurde jeweils 3l Leim hergestellt, wohingegen die Proben der Messungen am Beton sowie an dessen Bindemittelleim aus Mischungen mit einem Volumen von 75l entnommen wurden. Um den Einfluss der Umgebungstemperatur zu betrachten, wurde die Wärmeflussmessung bei 5 °C, 10 °C, 20 °C und 30 °C

durchgeführt. Hierbei wurden die Ausgangsstoffe bei der jeweiligen Temperatur vor-temperiert und die Probengefäße unmittelbar nach Mischende in das Kalorimeter eingebracht.

4.2.2. Messen von Druckfestigkeit, E-Modul und Verbundverhalten

Die Druckfestigkeit wird an Würfeln mit einer Kantenlänge von 15 cm in Anlehnung an DIN EN 12390-3 [155] bestimmt. Die Belastungsgeschwindigkeit wird dabei an die geringe Betonfestigkeit des Warmbetons angepasst und auf 4,5 kN/s festgelegt, um eine zu kurze Prüfdauer von nur wenigen Sekunden zu vermeiden, die zu einer Überschätzung der Druckfestigkeit führen kann. Eine solche Reduzierung der Belastungsgeschwindigkeit ist für die Druckfestigkeitsprüfung von haufwerksporigem Leichtbeton nach DIN EN 1354 [163] ebenfalls vorgesehen. Demnach ist über die Belastungsgeschwindigkeit eine Belastungsdauer zwischen 30 s und 120 s einzustellen.

Da der Warmbeton einem haufwerksporigen Leichtbeton mit porosierter Matrix nach [90] entspricht, wird aus der ermittelten Druckfestigkeit nach DIN EN 1520 [12] die charakteristische Festigkeit berechnet. Hierfür ist die Prüfung an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 100 mm oder an aus dem Bauteil entnommenen Würfeln mit einer Kantenlänge von 100 mm vorgesehen. Da die Probekörper in Würfelschalungen hergestellt wurden, werden die Messwerte der Druckfestigkeit hierfür zunächst mit einem Umrechnungsfaktor von 0,85 abgemindert, um die Druckfestigkeit von aus Bauteilen entnommenen Bohrkernen abzubilden. Der Umrechnungsfaktor für gesondert hergestellte Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm auf den Referenzprobekörper beträgt nach Tabelle 6 [12] 1,0. Für die Berechnung der charakteristischen Festigkeit f_k aus mindestens 6 Einzelprüfungen wird der Mittelwert der an Referenzprobekörpern ermittelten Druckfestigkeit nach Tabelle 3 [12] um den statistischen Beiwert K_n und die Standardabweichung s_n der Einzelmessungen wie folgt abgemindert.

$$f_k = f_{m,n} - K_n \cdot s_n \quad [\text{N/mm}^2]$$

Für die hier vorliegende Anzahl an Einzelprüfungen von $n \geq 10$ ist für den kleinsten Einzelwert eine Mindestdruckfestigkeit f_{\min} gefordert.

$$f_{\min} \geq 0,67 \cdot f_k \quad [\text{N/mm}^2]$$

Desweiteren darf der deklarierte Wert der Druckfestigkeit $f_{ck,g}$ die so aus den Prüfergebnissen abgeleitete charakteristische Druckfestigkeit nicht übertreffen.

Dieses Vorgehen, die charakteristische Druckfestigkeit aus Prüfergebnissen zu bestimmen, war nach den heute nicht mehr gültigen Technischen Regeln zu DIN EN

1520:2003 [144] nicht möglich. Entsprechend wurde die Druckfestigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton in Deutschland bisher über die Festigkeitsklasse angegeben. Die über die Festigkeitsklasse festgelegte charakteristische Druckfestigkeit f_{ck} ist geringer als die aus Prüfergebnissen berechnete. Den gestiegenen Anforderungen der EnEV [3] kann entweder mit dickeren Außenwänden oder mit einer reduzierten Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Baustoffe begegnet werden. Wird wie in dieser Arbeit die Möglichkeit genutzt, die charakteristische Druckfestigkeit aus Prüfergebnissen zu bestimmen, ist eine stärkere Absenkung der Wärmeleitfähigkeit trotz des damit einhergehenden Festigkeitsverlusts möglich.

Um neben der Hydratationswärmeentwicklung die Festigkeitsentwicklung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur zu untersuchen, werden Probekörper der bei 10 °C und bei 20 °C hergestellten Betone bei der jeweiligen Temperatur gelagert. Der Ausschaltzeitpunkt der bei 10 °C hergestellten Probekörper wird mithilfe der Reifefunktion nach EC 2 [141] abgeschätzt und mit der Wärmeflussmessung abgeglichen.

Für die Ermittlung des E-Moduls nach DIN EN 12390-13 [156] werden Zylinder mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Höhe von 30 cm verwendet. Dabei wird die Entwicklung über einen Zeitraum von 12 Monaten betrachtet. Während der Beobachtungsdauer sind die Probekörper zyklisch wechselnden relativen Luftfeuchten von 10 % und 80 % ausgesetzt, um einen Einfluss aus hygri-schen Formänderungen auf die Entwicklung des E-Moduls auszuschließen. Die Prüfung des E-Moduls erfolgt jeweils am Ende eines 112 h langen Beaufschlagungszeitraums mit niedriger oder hoher Luftfeuchte. Die Messwerte des E-Moduls werden den nach DIN EN 1520 [12] sowie den nach EC 2 [141] berechneten Werten gegenübergestellt. Der Zusammenhang zwischen E-Modul, Druckfestigkeit und Rohdichte ist in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 beschrieben.

Das Verbundverhalten wird mit Ausziehversuchen nach RILEM RC6 [151] untersucht. Hierfür werden jeweils 5 Probekörper mit Bewehrungsstahl mit einem Durchmesser von 8 mm und mit Glasfaserstäben, deren Durchmesser ebenfalls 8 mm beträgt, hergestellt. Für die Versuche mit Glasfaserbewehrung wird Schöck Combar[®] [164] verwendet. Die Ausziehversuche werden weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 0,3 mm/min bis zu einem Schlupf von 2 mm durchgeführt.

4.2.3. Messen der Schwind- und Kriechverzerrungen

Das Schwindverhalten wird im Rahmen des Kriechversuchs nach DAfStb-Heft 422 [157] betrachtet. Zusätzlich wurden Messungen in Schwindrinnen von Schleibinger durchgeführt. Der Beton in den Schwindrinnen ist dabei zyklisch wechselnden relativen Luftfeuchten von 10 % und 80 % ausgesetzt, so dass hygri-sche Formänderungen aufgezeichnet werden. Neben dem Schwindmaß, das nach einer Dauer von 365 Tagen nach dem deutlichen Abflachen der Messkurve abgelesen wurde, wurden die Schwindrinnen

in einem weiteren Versuch in einem CO₂-Schrank mit 6 % CO₂ beaufschlagt. Damit ist der Beton etwa dem 150-fachen CO₂-Gehalt der Atmosphäre ausgesetzt und die Carbonatisierungsreaktion erfolgt beschleunigt.

Die hohe Porosität des Warmbetons lässt, vergleichbar mit Porenbeton, einen schnellen Carbonatisierungsfortschritt bis in den Kernbereich von Bauteilen erwarten. Mit der Messung wird abgesichert, dass die Carbonatisierung keine Rissbildung zur Folge hat.

Nach [165] führt die Beschleunigung des Carbonatisierungsfortschritts mit einem CO₂-Gehalt über 3 % zu einer veränderten Struktur des Zementsteins. Demnach werden die CSH-Phasen bei höheren CO₂-Gehalten stärker gelöst. Auch das Volumen des im Zementstein enthaltenen Ettringits und Dicalciumsilikats wird durch das hohe CO₂-Angebot stärker reduziert. In der Folge steigt mit der Porosität des Betons auch die Größe der Poren [166].

Um die einzelnen Ausgangsstoffe als Ursache für hygrischen Formänderungen des Warmbetons auszuschließen, werden mit Messzapfen versehene Leim- und Mörtelprismen mit den Abmessungen 40 mm auf 40 mm auf 160 mm der gleichen wechselnden Feuchtebeaufschlagung ausgesetzt wie die Schwindrinnen. Das Quellen und Schwinden der Prismen wird für die Dauer von 63 Tagen betrachtet. Die aus dem Bindemittelleim des Warmbetons hergestellten Prismen sind bei Messbeginn bereits 6 Monate alt, so dass die Längenänderungen maßgeblich auf die Umgebungsfeuchte zurückzuführen sind und nur geringfügig vom Schwindvorgang überlagert werden.

Das Kriechen des Betons wird nach DAfStb-Heft 422 [157] ermittelt. Hierbei wird an Referenzzylindern zeitgleich die Schwindverzerrung gemessen, abweichend von dem Vorgehen nach [157] wurde die Schwindmessung ebenso wie die Kriechmessung bei 10 °C und 65 % r.F. durchgeführt. Die Kriechspannung beträgt ein Drittel der zuvor bestimmten Zylinderdruckfestigkeit. Das Kriechverhalten des Warmbetons wurde über eine Dauer von 365 Tagen betrachtet und mit Porenbeton der Festigkeitsklasse 4, der eine vergleichbare Druckfestigkeit aufweist, verglichen. Für diesen Vergleich wurden Bohrkerne mit den Abmessungen der Zylinder ($h = 30$ cm, $d = 15$ cm) aus Porenbetonsteinen entnommen. An diesen Zylindern wurden analog zum Warmbeton die Werte für Druckfestigkeit, Kriechen und Schwinden bestimmt.

Während das Kriechmaß $\varepsilon_{k,t}$ nach DAfStb-Heft 422 die Kriechverformung zum Zeitpunkt t abzüglich der anfänglichen elastischen Verformung beschreibt, wird die Kriechverformung nach Model Code 2010 [167] anhand der Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ beschrieben. Die Kriechzahl setzt die Kriechverformung zum Zeitpunkt t zur anfänglichen elastischen Verformung ins Verhältnis. Neben dem Betrachten der Kriechverzerrung über die Belastungsdauer und des spezifischen Kriechmaßes *spez* $\varepsilon_{k,t}$ wurden die Kriechzahl nach Model Code 2010 sowie das in DAfStb-Heft 131 aufgeführte Endkriechmaß nach Ross bestimmt [168]. Hierfür wird die Zeit pro Kriechverzerrung über die Belastungsdauer

aufgetragen. Aus der Belastungsdauer t , der Steigung b der Regressionsgeraden und dem Ordinatenabschnitt a lässt sich mit $\frac{t}{a+bt}$ das Kriechmaß und mit dem Kehrwert der Steigung das Endkriechmaß ermitteln.

Das Kriechen wurde an zwei Warmbetonen, D2 und E, sowie einem Porenbeton der Festigkeitsklasse 4 ermittelt. Warmbeton D2 ist der optimierte Beton (vgl. Tabelle A.4), die Zusammensetzung von Warmbeton E entspricht einem Zwischenstand während der Betonentwicklung. Dabei gelang am IWB erstmals die Herstellung von einem Warmbeton mit der niedrigen Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,11 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, so dass weiterführende Versuche wie die Kriechmessung durchgeführt wurden. Die Zusammensetzung ist in Tabelle A.1 gegeben. Aufgrund der sehr geringen Trockenrohichte von $440 \text{ kg}/\text{m}^3$ beträgt die Druckfestigkeit jedoch lediglich $3,2 \text{ N}/\text{mm}^2$, so dass die Zusammensetzung weiter angepasst wurde, bis mit Warmbeton D2 ein gutes Verhältnis zwischen niedriger Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit erreicht wurde.

4.2.4. Messen der Porengrößenverteilung

Im Bereich der Kapillarporen wurden vergleichende Messungen an Zementsteinproben des Warmbetons durchgeführt, die bei 10°C und 20°C hergestellt und gelagert wurden. Diese Poren sind mittels Quecksilberdruckporosimetrie messbar. Ab einem Porendurchmesser von $\geq 10 \mu\text{m}$ werden ebenfalls die mittels Luftporenbildner eingebrachten kugelförmigen Mikroluftporen erfasst.

Da Luftporen im Frischbeton nicht vollständig stabil sind, wurde der in diesem Größenbereich optisch ermittelte Porengehalt über die Verarbeitungsdauer von 3 h betrachtet.

Quecksilberdruckporosimetrie

Quecksilber ist aufgrund der hohen Oberflächenspannung σ_{Hg} und mit einem Kontaktwinkel Θ , der zwischen 115° und 140° angenommen wird, eine nichtbenetzende Flüssigkeit [61, 66]. Entsprechend findet beim Kontakt von Quecksilber und Beton kein kapillares Saugen statt, beim Aufbringen eines äußeren Drucks p wird das Quecksilber aber in den Porenraum gepresst. Die eingepresste Quecksilbermasse gibt Aufschluss über das Porenvolumen, während der hierfür erforderliche Druck Rückschlüsse auf den Porendurchmesser zulässt. Wird der aufgebrauchte Druck schrittweise gesteigert, werden zunächst die größeren Poren und mit zunehmendem Druck die feineren Poren mit Quecksilber gefüllt. Unter der vereinfachten Annahme einer zylindrischen Porenform lässt sich mit Hilfe der Washburn-Gleichung die Porengröße über den Porenradius r_p berechnen [44, 61, 66, 65].

$$r_p = \frac{2\sigma_{\text{Hg}}}{p} \cdot \cos \Theta \quad [\text{nm}]$$

Verdichtungsporen wie auch Luftporen im Makroporenbereich lassen sich ohne das Aufbringen von Druck mit Quecksilber füllen. Diese Poren lassen sich mittels Quecksilberdruckporosimetrie nur über die feinen Kapillarporen erschließen, weshalb sie mit der Messung nicht zuverlässig erfasst werden [61]. Bei üblichen Versuchsdurchführungen wird diesen großen Porenräumen nicht genügend Quecksilber zugeführt, um sie gänzlich zu verfüllen. Entsprechend liegt die Gesamtporosität über dem mittels Quecksilberdruckporosimetrie gemessenen Porenvolumen [44]. In Abhängigkeit des Messdrucks sind Porengrößen im Nano- und Mikrometerbereich messbar [66]. Wird mit Drücken bis zu 400 N/mm^2 gearbeitet, ist das Bestimmen von Gelporen mit einem Durchmesser von 2 nm bis 3 nm möglich [61], mit einem Druck von 200 N/mm^2 lassen sich nach [44] immerhin Poren mit einem Durchmesser von 8 nm erfassen. Der niedrigere Messdruck verringert das Risiko, dass während der Messung Risse im Porengefüge entstehen, die die Ergebnisse verfälschen [65]. Um Poren zu füllen, die hinter engen Öffnungen liegen, ist der für den Durchmesser der Öffnung erforderliche Druck aufzubringen. Verdichtungsporen und insbesondere die bei der Verwendung von LP-Bildnern in großer Anzahl die Kapillaren unterbrechenden kugelförmigen Luftporen führen in der Folge dazu, dass das Volumen der sehr feinen Poren überschätzt wird [44].

Für die Messung der Porengrößenverteilung nach DIN 66133 [158] wurde das Quecksilberporosimeter Pascal 140 und Pascal 440 von Porotec verwendet, womit ein Messdruck bis 400 N/mm^2 möglich ist. Die schrittweise Steigerung des Prüfdrucks bis auf 200 N/mm^2 ermöglichte die Porengrößenermittlung im Bereich zwischen 7 nm und $100 \mu\text{m}$.

Die Porengrößenverteilung wurde aus den durchgeführten Messungen mit einem Kontaktwinkel von 140° und der Oberflächenspannung des Quecksilbers von $0,48 \text{ N/m}$ bei 20°C berechnet. Da der Feuchtegehalt die gemessene Porengrößenverteilung beeinflusst, sind die Messproben zu trocknen. Die Proben wurden jeweils im wirksamen Betonalter von 28 Tagen aus einem Würfel entnommen und getrocknet. Bei einer Trocknung mit Temperaturen über 100°C sind Strukturveränderungen im Gefüge möglich [44]. Deswegen wurde die Porengrößenverteilung jeweils an einer bei 70°C und an einer bei 105°C getrockneten Probe ermittelt.

Optische Auswertung der Porengrößen

Nach [43] wirken sich insbesondere kleine Luftporen positiv auf die Dauerhaftigkeit von Beton aus. Mit der Zugabe von Luftporenbildnern werden Poren in der gewünschten Größenordnung mit einem Durchmesser $< 300 \mu\text{m}$ in den Beton eingebracht. Poren mit einem Durchmesser $\geq 170 \mu\text{m}$ sind mit einem Mikroskop erkennbar. Zur Auswertung der Porengrößenverteilung in diesem Bereich wurde ein Digitalmikroskop VHX-5000 verwendet. Die bei zwanzigfacher Vergrößerung erstellten Aufnahmen der Probekörper

werden in Kontrastbilder umgewandelt, aus denen das Auslesen der Porengrößenverteilung möglich ist. Abbildung 4.1 zeigt das Vorgehen zur Porengrößenbewertung mit dem Digitalmikroskop. Der Kontrast der Aufnahme wird durch Streiflicht erhöht, um Bilder zu erhalten, die in Kontrastbilder umwandelbar sind (Bild a). Anschließend wird der auszuwertende Ausschnitt gewählt, um die Poren in der Matrix des Betons zu betrachten (Bild b). Da Luftporen im Frischbeton nicht vollständig volumenstabil sind, wird die mittels optische Auswertung messbare Porosität vom Herstellzeitpunkt der Probekörper beeinflusst. Entsprechend wurde die Änderung der Luftporen sowohl im Zementstein, als auch im Beton in Abhängigkeit des Verarbeitungszeitpunkts betrachtet. Hierfür wurden jeweils Probekörper untersucht, die unmittelbar nach Mischende sowie 1, 2 und 3 Stunden nach Mischbeginn hergestellt wurden. Ein Probekörper, der bei 10 °C hergestellt wurde, wurde ebenfalls in den Vergleich mit einbezogen.

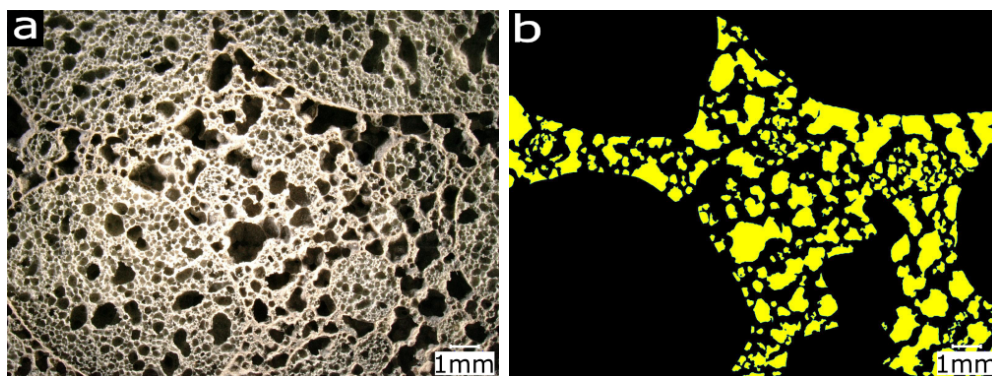


Abbildung 4.1.: Optische Porengrößenbewertung, a) Aufnahme mit Streiflicht und b) Umwandlung des auszuwertenden Bereichs in ein Kontrastbild

4.2.5. Messen der Sorptionsisotherme

Die Wasserdampfsorptionsmessungen wurden mit dem Dynamic Vapor Sorption, Modell 2, von Porotec durchgeführt. Als Trägergas zum Einstellen der relativen Luftfeuchte in der Messzelle wurde Stickstoff verwendet. Beginnend bei 0% wurde die relative Luftfeuchte in den in Tabelle 4.2 angegebenen Schritten erhöht und anschließend wieder reduziert. Sobald die Analysewaage keine Massenänderung der Betonprobe infolge von Feuchteaufnahme oder -abgabe mehr aufzeichnete, wurde die relative Luftfeuchte neu eingestellt.

Tabelle 4.2.: Relative Luftfeuchte zur Bestimmung der Sorptionsisotherme

	Relative Luftfeuchte [M. – %]											
Adsorption	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	98
Desorption	98	95	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0

Da die Umgebungstemperatur die Erstarrungsdauer und die Phasenbildung während der Zementhydratation beeinflusst, wurde die Feuchtesorption sowohl an bei 10 °C als auch an bei 20 °C hergestellten und gelagerten Betonproben ermittelt. Um Strukturveränderungen aus der Probenvorbereitung auszuschließen, wurde jeweils eine Probe bei 70 °C und eine bei 105 °C getrocknet. Die Probennahme und -trocknung erfolgte in einem wirksamen Betonalter von 28 Tagen.

4.2.6. Messen der Wärmeleitfähigkeit

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen ist mittels Heizbrückenverfahren oder Plattenverfahren möglich. Beim Heizbrückenverfahren wird analog zum Heißdrahtverfahren nach DIN EN 993-15 [159] ein weiterentwickelter Sensor zwischen den beiden Hälften eines geteilten Probekörpers eingebettet. Der Sensor dient sowohl als Wärmequelle als auch als Widerstandsthermometer, so dass die Erwärmung des Probekörpers durch den Stromfluss aufgezeichnet werden kann. Mit diesem dynamischen Messverfahren wird der Temperaturanstieg im Probekörper als Funktion der Zeit gemessen. Im Gegensatz zu stationären Verfahren ist neben einer kurzen Messdauer zusätzlich das Messen der Temperaturleitfähigkeit möglich. Die Weiterentwicklung des Sensors vom Heizstreifen (Transient-Hot-Strip: THS) zur Heizbrücke (Transient-Hot-Bridge: THB) beinhaltet eine Verlängerung des Strompfades durch Mäanderbildung, vgl. Abbildung 4.2. Dieser Streifen ist in zwei galvanisch getrennte Einzelwiderstände mit den beiden Längen L_1 und L_2 geteilt. Durch Abziehen des Spannungsabfalls im kurzen Segment ist die Ermittlung des Signals aus der Streifenmitte mit der effektiven Länge L_{eff} des Sensors möglich, wodurch Randeffekte kompensiert werden. Die Kombination von vier Streifen zu einer Heizbrücke reduziert die Empfindlichkeit des Sensors. Der verwendete THB-Sensor ist für Wärmeleitfähigkeiten zwischen $0,04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und $6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und damit für Warm- sowie Normalbetone geeignet [169].

Das Heizbrückenverfahren ermöglicht an Gebäuden ebenfalls die einseitige Messung. Um die Wärmeleitfähigkeit λ einer Wand zu ermitteln, ist die freie Seite des Sensors mit einem Wärmedämmmaterial abzudecken und der Messwert anschließend zu korrigieren. Näherungsweise ist die Verwendung eines Korrekturfaktors k_w in Abhängigkeit des verwendeten Wärmedämmmaterials möglich:

$$\lambda = \lambda_{\text{einseitig}} \cdot k_w = \lambda_{\text{einseitig}} \cdot (2 - \lambda_{\text{Wärmedämmmaterial}}) \quad [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$$

Für eine bessere Vergleichbarkeit der an Probekörpern und Wandelementen ermittelten Messwerte wird in Abschnitt 6.3.7 ein für den entwickelten Warmbeton spezifischer Korrekturfaktor in Abhängigkeit der Materialfeuchte vorgeschlagen (vgl. Abbildung 6.19 und Abbildung 6.20).

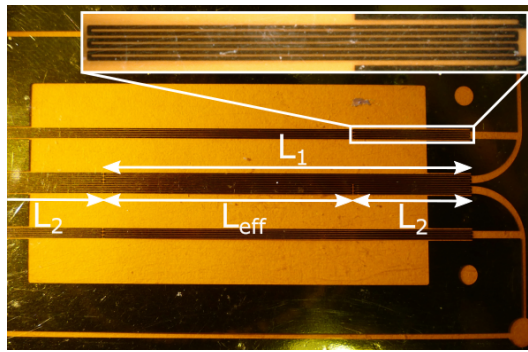


Abbildung 4.2.: THB-Sensor mit galvanisch getrennten Einzelwiderständen der Längen L_1 und L_2 zur Ermittlung von Randeffekten und der effektiven Länge L_{eff} des Sensors

Die Materialinhomogenität von Leichtbeton, dessen Bestandteile Zementstein, leichte Gesteinskörnung und Luftporen die Wärmeleitfähigkeit punktuell beeinflussen, führt insbesondere bei Messungen an kleinen Probekörpern zu deutlichen Streuungen der einzelnen Messwerte. In [170] wird der Einfluss der Materialinhomogenität von Beton auf die Messung der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität betrachtet. Hierfür wurde ein Plattenmessgerät für kleine Probekörper mit einem Durchmesser zwischen 50 mm und 61 mm und einer Probendicke von 10 mm und 20 mm verwendet. Untersucht wurden zwei Betone mit einem Größtkorn von 16 mm. Die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit streuen um den aus der Betonrohddichte abgeleiteten Erwartungswert. Für die zuverlässige Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von inhomogenem Material wird das Prüfen von wenigstens 10 Probekörpern, sowie beim Messen an neuem Material das Anpassen der Prüfeinstellungen, empfohlen.

Beide Empfehlungen sind auf Messungen mit dem in dieser Arbeit verwendeten THB-Verfahren übertragbar. Hierbei ist die Prüffläche mit einer Sensorgröße von 82 mm auf 42 mm mit dem Versuchsaufbau in [170] vergleichbar. Ein Versetzen des Sensors zwischen den Probekörperhälften entspricht dabei einer Messung an einem anderen Probekörper. Vor Beginn der Messungen sind zunächst geeignete Einstellungen für Heizstrom und Messdauer über jeweils eine Messreihe zu bestimmen. Oberhalb eines kritischen Heizstroms ist es nicht möglich, die Wärmeleitfähigkeit zu berechnen, so dass die Wärmeleitfähigkeit unterschätzt wird. Die Messdauer ist so lang zu wählen, dass das Messsignal linear ansteigt. Ab dieser Mindestmessdauer wird ein konstanter Messwert ausgegeben [169].

Das derzeit gängige Plattenverfahren nach DIN EN 12664 [160] zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit erfordert neben deutlich längeren Messzeiten von mehreren Stunden ebenfalls größere Probekörper mit Kantenlängen von 500 mm. Der Aufwand ist entsprechend höher als bei einer THB-Messung. Um bereits zu einem frühen Zeitpunkt der Betonentwicklung Informationen über den Einfluss der Mischungszusammensetzung

auf die Wärmeleitfähigkeit zu erhalten, wurde das THB-Verfahren gewählt. Vergleichsmessungen beider Verfahren zeigten, dass die am IWB mit dem Heizbrückenverfahren ermittelten Werte der Wärmeleitfähigkeit in der gleichen Größenordnung oder über den Messwerten des Plattenverfahrens liegen, so dass die Messwerte während der Betonentwicklung auf der sicheren Seite liegen.

Nach der abgeschlossenen Betonentwicklung werden Probekörper zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit sowohl mit dem Plattenverfahren als auch mit dem Heizbrückenverfahren betrachtet, um die gewonnenen Werte mit dem Referenzverfahren zu bestätigen. Hierfür wurden nach der Messung der Wärmeleitfähigkeit im Plattenverfahren die Seitenflächen der Probekörper angeschliffen, um einen direkten Vergleich der beiden Verfahren zu erhalten.

Um neben der Vergleichbarkeit mit den während der Betonentwicklung ermittelten Messwerten eine Abschätzung für Messwerte an Gebäuden vornehmen zu können, wurde die Wärmeleitfähigkeit mittels THB-Verfahren sowohl an Probekörpern, als auch an einem kleinen Wandelement ermittelt. Die Wärmeleitfähigkeit des Wandelementes wurde dabei im Gegensatz zu der der Probekörper in einer einseitigen Messung am ungetrockneten Element bestimmt.

Zur Ermittlung des Bemessungswerts der Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN ISO 10456 [76] ist über die Messwerte zunächst der Nennwert zu bestimmen. Dafür ist die Messung der Wärmeleitfähigkeit der getrockneten Probekörper bei 10 °C durchzuführen. Der Nennwert setzt sich aus dem Mittelwert der Messwerte, der Standardabweichung der Messwerte, sowie einem Faktor k_2 , der die Anzahl der durchgeführten Messungen berücksichtigt, zusammen. Der Koeffizient k_2 ist Tabelle C.1 in DIN EN ISO 10456 zu entnehmen. Da die Wärmeleitfähigkeit im Bauteil vom Feuchtegehalt beeinflusst wird, ist bei der Bestimmung des Bemessungswerts zusätzlich ein vom Baustoff abhängiger Feuchteumrechnungsfaktor F_m zu berücksichtigen. Dieser ist mithilfe der in DIN EN ISO 10456, Tabelle 4, aufgeführten feuchteschutztechnischen Eigenschaften von Wärmedämm- und Mauerwerkstoffen zu ermitteln.

Um den Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Wärmeleitfähigkeit zu berücksichtigen, wurden von jeder Mischung Probekörper zum Messen der Wärmeleitfähigkeit hergestellt. Da ein Vergleich der Messwerte untereinander zunächst ausreichend war, wurden die Probekörper zwar von Beginn an getrocknet und die Oberflächen für eine ausreichende Ebenheit und einen flächigen Kontakt zum Sensor geschliffen. Das für die Ermittlung des Bemessungswertes erforderliche anschließende Kühlen auf eine Temperatur von 10 °C sowie das Messen bei 10 °C wurde jedoch erst an Probekörpern der endgültigen Mischungszusammensetzung durchgeführt. Bei den Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Zusammensetzungen im Vergleich handelt es sich folglich um Mittelwerte aus jeweils 12 Einzelmessungen.

4.2.7. Bewertung der Dauerhaftigkeit

Neben dem Carbonatisierungsverhalten wurde die Beständigkeit gegenüber Abwitterung infolge Feuchteeinwirkung und Frost-Tau-Wechseln sowie die Wasseraufnahme untersucht. Die genannten Eigenschaften werden maßgeblich vom hohen Luftporengehalt des Warmbetons beeinflusst. Da sowohl der geringe Zementgehalt des Warmbetons als auch der schnelle Carbonatisierungsfortschritt eine schädigende Alkalireaktion ausschließen, sind bezüglich AKR keine weiterführenden Untersuchungen erforderlich.

Carbonatisierungsverhalten

Da sich Warmbeton durch eine niedrige Wärmeleitfähigkeit auszeichnet und nicht mit Betonstahl bewehrt wird, resultiert aus der Absenkung des pH-Werts infolge der Carbonatisierungsreaktion keine negative Auswirkung auf die Dauerhaftigkeit. Für den Vergleich mit einem gefügedichten Holzleichtbeton in Abschnitt 7.2 wurde das Carbonatisierungsverhalten dennoch untersucht. Für die Ermittlung des Carbonatisierungsfortschritts wurden Prismen mit einem Querschnitt von 10 cm auf 10 cm betrachtet. Ein Teil der Probekörper wurde analog zu den Holzbetonproben mit 6 Vol. – % CO₂ beaufschlagt, die anderen der Umgebungsluft ausgesetzt.

Die Ein- bzw. Auslagerung der Probekörper begann mit einem Betonalter von 28 Tagen. Die Prismen wurden gespalten und die frische Bruchfläche mit Phenolphthaleinlösung eingesprüht, um die Carbonatisierungsgrenze sichtbar zu machen. Anschließend wurde die Carbonisierungstiefe an jeder Seite an acht Stellen mit einem Abstand von jeweils 1 cm abgelesen. Die Prüfung wurde bis zur vollständigen Carbonatisierung der Probekörper im Alter von 140 Tagen jeweils im Abstand von 28 Tagen wiederholt.

Frost-Tau-Widerstand

Der Frost-Tau-Widerstand von Beton wird nach DIN CEN/TS 12390-9 [161] ermittelt. Da nicht mit Tausalzbelastung zu rechnen ist, wird entionisiertes Wasser als Prüfflüssigkeit im Plattenverfahren verwendet. Die Masse des abgewitterten Materials wird nach Prüfvorschrift auf die Fläche von einem Quadratmeter bezogen angegeben und zusätzlich mit einem dichtebezogenen Korrekturfaktor k_ρ für Leichtbeton angepasst.

$$k_\rho = \frac{\text{Dichte}_{\text{Normalbeton}}}{\text{Dichte}_{\text{Warmbeton}}} \quad [-]$$

Die Anwendung des Korrekturfaktors ermöglicht den Vergleich der abgewitterten Masse mit Normalbeton.

Messen der Wasseraufnahme

Der Wasseraufnahmekoeffizient W_w nach DIN EN ISO 15148 [162] beschreibt die einseitige Wasseraufnahme von Baustoffen beispielsweise bei Beregnung. Durch teilweises Eintauchen von Probekörpern wird die kapillare Wasseraufnahme ermittelt, die den Feuchtegehalt und damit die Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons bestimmt.

In einer Versuchsreihe wird neben dem Einfluss der Herstelltemperatur auf die Wasseraufnahme der Einfluss des verwendeten Luftporenbildners sowie der Verdichtung betrachtet. Der Temperatureinfluss wird an Probekörpern aus [171] ermittelt, die bei 10 °C bzw. 20 °C hergestellt und bis zum wirksamen Alter von 28 Tagen bei der jeweiligen Temperatur gelagert wurden. Neben dem verwendeten LP-Bildner auf Tensidbasis wird der Beton zum Vergleich mit einem Schaumbildner auf Proteinbasis hergestellt. Nach der Anpassung von Frequenz und Amplitude für eine optimale Verdichtung des Warmbetons wurde die Wasseraufnahme erneut ermittelt, um den Einfluss der Verarbeitung aufzuzeigen. Zusätzlich wird die Wasseraufnahme des Bindemittelleims bestimmt.

4.2.8. Ökobilanzierung

Für eine vergleichende Ökobilanzierung von Warm- und Holzbeton nach DIN EN ISO 14040 [85] wurde für die funktionelle Einheit ein Quadratmeter Außenwandfläche gewählt. Damit handelt es sich um einen Vergleich auf Bauteilebene. Die Umweltauswirkungen für Herstellung, Nutzung und Rückbau werden für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren betrachtet. Die Bilanzierung wird mit Hilfe des Ökobilanzierungs- und Datenbanktools GaBi Education durchgeführt [172].

Der U-Wert einer 50 cm dicken monolithischen Wand aus dem in dieser Arbeit entwickelten Warmbeton beträgt $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Setzt sich die Wand aus Holzbeton und einer 140 mm dicken Wärmedämmplatte mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,037 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ zusammen, ist die Tragschicht aus Holzbeton für den gleichen U-Wert in einer Stärke von 17,5 cm auszuführen. Der Verbund zwischen Wärmedämmung und Wand wird mittels Klebemörtel hergestellt.

Die beiden Betone werden hinsichtlich der ressourcenbezogenen Kategorie Primärenergiebedarf betrachtet. Hierbei wird zwischen Primärenergie aus erneuerbaren Ressourcen (PEe) und aus nicht erneuerbaren Ressourcen (PEne) unterschieden. Dazu fließen die emissionsbezogenen Kategorien Treibhauspotential (GWP), Ozonabbaupotential (ODP), Versauerungspotential (AP) und Eutrophierungspotential (EP) in den Vergleich ein [172].

4.3. Ausgangsstoffe

Der Betonentwicklung geht eine Charakterisierung möglicher Ausgangsstoffe voraus, um eine Mischung mit hoher Packungsdichte festlegen zu können.

4.3.1. Wahl der Ausgangsstoffe

Als leichte Gesteinskörnung wird Blähglas von Liaver verwendet, das sich durch eine niedrige Rohdichte, eine Wärmeleitfähigkeit von nur $0,07 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [129] und eine für die Verarbeitbarkeit vorteilhafte niedrige Wasseraufnahme von ca. 1,0 M. – % auszeichnet (vgl. Tabelle 4.5).

Aufgrund der zu erwartenden hohen Hydratationswärme im Inneren eines 50 cm dicken Wandbauteils aus Warmbeton werden für die ersten Entwicklungsschritte zwei Hochofenzemente gewählt. Zur Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit des Zementsteins wird neben einem Glasmehl ein Schleifstaub betrachtet, der bei der Herstellung von Reapor-Schallabsorberplatten [173] anfällt und folglich neben Glas auch gebranntes Tonmehl und Wasserglas enthält. Zur Steigerung der Packungsdichte werden Kalksteinmehle und das gebrannte Tonmehl, das bei der Herstellung des Blähglases als Trennmittel eingesetzt wird, in Betracht gezogen. Um die Frischbetonstabilität zu erhöhen und eine ausreichende Druckfestigkeit zu erhalten, wird ebenfalls die Verwendung von Silikastaub geprüft. Sowohl die Verwendung von Hochofenzement als auch die eines sehr feinen Puzzolans wie Silikastaub reduziert die Gefahr, dass mit einer hohen Wärmeentwicklung eine treibende DEF auftritt (vgl. Abschnitt 2.5). Der hohe Hüttensandgehalt eines Hochofenzements trägt zudem zur Reduzierung der Hydratationswärmeentwicklung bei.

Für das Porosieren der Matrix wird die Wirksamkeit verschiedener Luftporenbildner in Kombination mit dem Bindemittel sowie die Zugabe von Mikrohohlkugeln aus Kunststoff untersucht. Neben den LP-Bildnern TM AEA-B und TM 89/29E von Tillman Chemische Baustoffe wird mit Neopor ein Proteinschaumbildner betrachtet. Um die Wirksamkeit der LP-Bildner nicht zu verringern, wird mit dem Fließmittel G-2 von Sika ein PCE-Fließmittel verwendet, das keinen Entschäumer enthält. Zur Stabilisierung der Luftporen im Frischbeton werden stabilisierende Zusätze betrachtet, zum Einstellen der Verarbeitbarkeitsdauer Verzögerer und Beschleuniger. Da bei einem hochporösen Warmbeton mit einer hohen Wasseraufnahme zu rechnen ist, wird zusätzlich die Wirkung verschiedener hydrophobierender Mittel verglichen.

Zusätzlich zu den Ausgangsstoffen, die für die Herstellung des Warmbetons in Betracht gezogen werden, werden in Abschnitt 4.3.3 die im Holzleichtbeton enthaltenen Holzspäne aufgeführt.

4.3.2. Analyse der Ausgangsstoffe

Sowohl für die sieblinien- als auch für die packungsdichteoptimierte Mischungsentwicklung bilden die Rohdichte und die Partikelgrößenverteilung der Feststoffe die Grundlage. Die Dichte wurde mit dem Hydro 5 nach Bottke [174, 175] ermittelt. Die Korngrößenverteilung des Blähglases wurde mit dem fotooptischen Partikelanalysegerät PartAn 3001 L bestimmt, die Partikelgrößenverteilung der Zemente und Zusatzstoffe mittels Laserbeugung mit dem S3500 von Microtrac. Im Rahmen der Partikelanalyse ist neben der Ermittlung der Korngrößen die Auswertung verschiedener Kennwerte zur Kornform möglich. Für die sieblinienbasierte Mischungsentwicklung mit dem modifizierten Andreasen-Modell wurde der Kornindex betrachtet.

Für die packungsdichteoptimierte Mischungsentwicklung mit Hilfe der Software BétonlabPro wird die Kenntnis weiterer Materialkennwerte vorausgesetzt. Für die Gesteinskörnung ist neben der Wasseraufnahme nach DIN EN 1097 – 6 [176] die Packungsdichte der einzelnen Fraktionen nach [177] zu ermitteln. Dabei wird sowohl über eine Auflast als auch über eine festgelegte Fallhöhe des Aufbaus eine definierte Verdichtungsenergie in die lose geschüttete Messprobe eingebracht und die Packungsdichte g^* über das Verhältnis von Schüttdichte ρ_{Sch} zu Trockenrohddichte ρ_d berechnet:

$$g^* = \frac{\rho_{\text{Sch,verdichtet}}}{\rho_d} \quad [-]$$

Die Packungsdichte der Feinstoffe wird nach [26] an Bindemittelleim bestimmt, der Fließmittel in Höhe der Sättigungsdosierung und die für das Einstellen der Normsteife nach DIN EN 196 – 3 [178] erforderliche Wassermenge enthält. Da die verwendeten Mengen an Wasser, Fließmittel und Bindemittel bekannt sind, lässt sich die Feststoffkonzentration c berechnen:

$$c = \frac{1}{1 + \rho_{\text{Bindem.}} \cdot \frac{m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{Bindem.}}}} \quad [-]$$

Sofern mit dem Compressible Packing Model zusätzlich zu Packungsdichte, Mischdauer und Frischbetoneigenschaften auch die Festigkeitsentwicklung prognostiziert werden soll, ist im Vorfeld der Mischungsentwicklung ebenfalls die Festigkeitsentwicklung der Zemente und der reaktiven Zusatzstoffe zu ermitteln.

4.3.3. Materialeigenschaften

Rohdichte, Packungsdichte und Kornindex der Gesteinskörnung sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst. Die Partikelgrößenverteilungen sind für jede Fraktion in Abbildung 4.3 dargestellt. Aus dem Kornindex lässt sich ein Einfluss der Gesteinskörnung auf die Ver-

Tabelle 4.3.: Dichte und Packungsdichte der betrachteten Gesteinskörnung

		Rohdichte ρ [kg/m ³]	Packungsdichte g^* [-]	Kornindex L/B [-]
Blähglas	0,25/0,5	512	0,638	1,49
	0,5/1,0	435	0,633	1,47
	1/2	381	0,647	1,42
	2/4	310	0,699	1,36
	4/8	286	0,701	1,56
	8/16	282	0,654	1,72
Aerogelgranulat	1/4	70		
Gesteinskörnung	0/2	2650	0,623	1,88
Holzspäne (ummantelt)	2/8	780	0,555	3,18

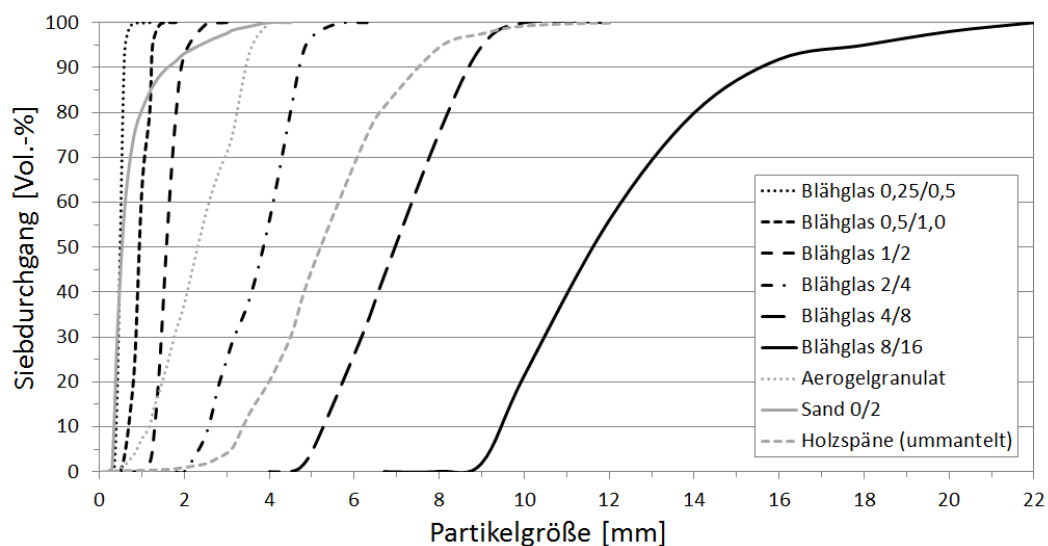


Abbildung 4.3.: Partikelgrößenverteilung der betrachteten Gesteinskörnung

arbeitbarkeit auswirken. Die Verwendung von verhältnismäßig runder Gesteinskörnung wie Blähglas wirkt sich mit der geringen Abweichung von Kornlänge zu Kornbreite positiv auf die Fließfähigkeit von Frischbeton aus. Zur Herstellung eines Holzbetons mit weicher Konsistenz ist aufgrund der länglichen Spanform, die sich in dem hohen Kornindex von 3,18 widerspiegelt, dagegen ein entsprechend höheres Leimvolumen erforderlich.

Die Rohdichte des Blähglases sinkt mit steigender Korngröße. Zur Dichtereduzierung des Warmbetons ist folglich ein hoher Anteil an grober Gesteinskörnung von Vorteil. Auch die Packungsdichte lässt sich in Zusammensetzungen mit einem größeren Größtkorn in der Regel weiter erhöhen. Bei der Betrachtung der Packungsdichte fällt auf, dass die feineren Fraktionen des Blähglases eine niedrigere Packungsdichte aufweisen als die Fraktionen der groben Gesteinskörnung. Das deutet bereits auf unterschiedliche Zusammensetzungen der Gesteinskörnung nach dem modifizierten Andreasen-Modell

und dem CPM hin. Sowohl die sieblinienoptimierte als auch die packungsdichteoptimierte Zusammensetzung der Gesteinskörnung werden in Abschnitt 5.1 besprochen (vgl. Tabelle 5.1). Rohdichte und Packungsdichte des für die Betonentwicklung betrachteten Bindemittels sind in Tabelle 4.4 aufgeführt. Ein hoher Zementgehalt führt neben einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der hohen Rohdichte zur Steigerung der Betondichte. Was die in Kombination mit Fließmittel bestimmte Packungsdichte betrifft, weist der Zement für sich betrachtet bereits eine vergleichsweise hohe Packungsdichte auf.

Die in Abbildung 4.4 dargestellten Partikelgrößenverteilungen zeigen, dass mit einer Zementsubstitution durch das Kalksteinmehl Stoneash keine nennenswerte Steigerung der Packungsdichte möglich ist, wohingegen mit dem sehr feinen Kalksteinmehl Compact ein Reduzieren der Hohlräume zwischen den Zementpartikeln möglich ist. Auch ein Ab-

Tabelle 4.4.: Dichte und Packungsdichte des betrachteten Bindemittels

	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Packungsdichte c [–]
Zement CEM III/A 42,5 N	3000	0,6294
Gebranntes Tonmehl	2700	0,4944
Schleifstaub	2320	0,2514
Glasmehl SW	2480	0,5941
Silikastaub RW-Füller	2300	0,3250
Kalksteinmehl Stoneash	2700	0,6931
Kalksteinmehl Easyflow	2650	0,7168
Kalksteinmehl Compact	2700	0,5859
SikaAer Solid	200	

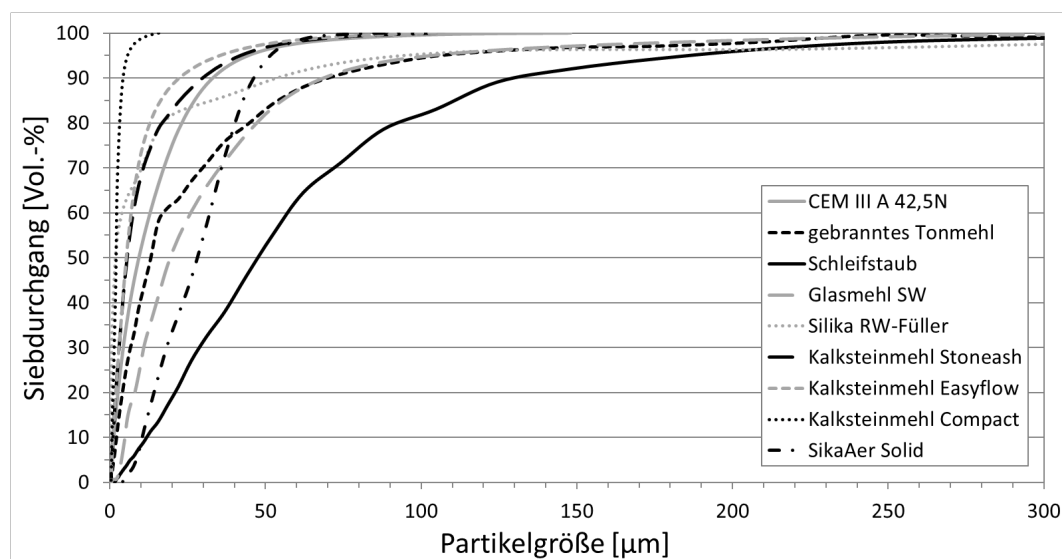


Abbildung 4.4.: Partikelgrößenverteilung des betrachteten Bindemittels

mischen mit größeren Zusatzstoffen wie dem gebrannten Tonmehl und dem Schleifstaub ist zur Optimierung der Feststoffzusammensetzung zu prüfen. Die aufgrund der hohen Reaktivität von Silikastaub festigkeitssteigernde Wirkung ist trotz der an sich geringen Packungsdichte bekannt, vgl. Abschnitt 3.1.3. Entsprechend ist die Verwendung von Silikastaub zum Einhalten der geforderten Druckfestigkeit bei der Mischungsentwicklung des Warmbetons einzubeziehen.

Wasseraufnahme der Gesteinskörnung

Die in Anlehnung an DIN EN 1097-6 [176] ermittelte Wasseraufnahme von Holzspänen und Blähglas ist in Tabelle 4.5 zusammengefasst. Blähglas zeichnet sich durch eine niedrige Wasseraufnahme von ca. 1 M. – % innerhalb einer Stunde aus, die im Wesentlichen durch die Benetzung der Oberfläche ausgelöst wird und entsprechend bei feinen Fraktionen etwas höher ist. Demgegenüber ist im Fall der Holzspäne eine mit der Ummantelung zwar halbierte aber dennoch hohe Wasseraufnahme von 44 M. – % zu verzeichnen, die in der Mischungszusammensetzung zu berücksichtigen ist. Werden die Holzspäne nicht vorgemischt, entziehen sie dem Frischbeton während des Mischvorgangs Wasser. Die Fließfähigkeit von Holzbeton wird durch die Wasseraufnahme und Kornform der Holzspäne eingeschränkt, wohingegen es bei der Verwendung von Blähglas die sehr geringe Dichte ist, die das Herstellen selbstverdichtender Betone erschwert. Der hohe Dichteunterschied zwischen Blähglas und Zementleim begünstigt ein Entmischen fließfähiger Betone.

Tabelle 4.5.: Wasseraufnahme von Blähglas und Holzspänen

		Wasseraufnahme [M. – %]		
		5 min	15 min	60 min
Blähglas	fein (0,25/2)	0,27	0,66	1,25
	grob (2/16)	0,26	0,37	0,76
Holzspäne	Rohmaterial	81	87	87
	ummantelt	36	40	44

Hydratationswärmeentwicklung von Zement und Zusatzstoffen

Die Hydratationswärmeentwicklung des Zements und der Zusatzstoffe wurde jeweils einzeln und in demselben Mischungsverhältnis wie im Beton aufgezeichnet. Die Wärmeflussmessungen der Ausgangsstoffe sind in Abbildung 4.5 dargestellt, der Zement zeigt die höchste Wärmeentwicklung, die Höhe des Silikatpeaks ist abhängig vom Zementgehalt des jeweiligen Bindemittelleims. Der maximale Wärmefluss des Zementleims

wird nach knapp 50 Stunden und damit einen Tag vor dem des Bindemittelleims aufgezeichnet. Ursache hierfür ist neben der nachgelagerten Reaktion der Zusatzstoffe der Mischeinfluss, da die Silikatpeaks der Messungen an calciniertem Tonmehl und Silika in Kombination mit Zement im Zeitraum dazwischen auftreten. Die Herstellung des Bindemittelleims im Suspensionsmischer führt zu einer besseren Wirksamkeit des Luftporenbildners, wodurch auch die mit ihm einhergehende Verzögerung der Hydratation verstärkt wird.

Während der zeitliche Verlauf der Wärmeentwicklung der Silika-Zement-Mischung dem des Zementleims nahezu entspricht, zeigt die Messung von Silika in einer alkalischen Lösung bereits deutlich früher einen Anstieg des Wärmeflusses. Die Messung zeigt jeweils nach 23,5 Stunden und nach 55 Stunden einen Peak in der Wärmeentwicklung. Die Hydratationswärmeentwicklung des calcinierten Tons entsteht dagegen, sowohl in der Abmischung mit Zement als auch in der alkalischen Lösung gemessen, verzögert. Bei Messbeginn 1 Stunde nach dem Kontakt mit Wasser wird noch während weiteren 1 bis 2 Stunden ein Anstieg des Wärmeflusses aufgezeichnet, bevor die Ruhephase der Hydratation beginnt. Auch die weitere Reaktion erfolgt verzögert, der zweite Peak im Wärmefluss der Ton-Zement-Mischung tritt 13 Stunden nach dem des Zementleims auf. Nach weiteren 100 Stunden kommt der dritte Peak hinzu. Nur durch die alkalische Lösung angeregt, ist beim calcinierten Ton nach der ersten Reaktionsphase keine weitere Änderung des Wärmeflusses messbar.

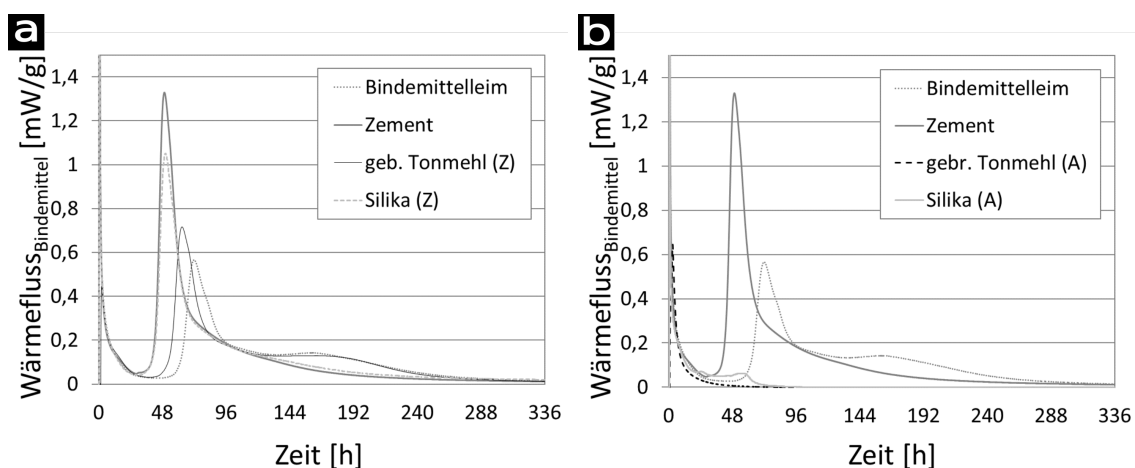


Abbildung 4.5.: Hydratationswärmeentwicklung der Zusatzstoffe a) in einer Abmischung mit Zement und b) in einer alkalischen Lösung

4.3.4. Besonderheiten bei der Mischungsentwicklung von Holzleichtbeton

Während für die Frischbetonstabilität von Infraleichtbeton ein hochviskoser und mit Luftporen versetzter Leim von Vorteil ist, ist bei der Herstellung von Holzbeton auf einen ausreichenden Wassergehalt zu achten, mit dem die Wasseraufnahme der Holzspäne kompensiert wird. Ein Vornässen der Holzspäne ist hierbei von Vorteil. Jedoch ist die dafür verwendete Wassermenge so zu wählen, dass das Wasser ins Innere der Späne aufgenommen wird. Legt sich ein Wasserfilm auf die Oberfläche der Späne, wird die Kontaktzone zum Zementstein beeinträchtigt. Da beim Mischen von Holz und Mörtel darauf zu achten ist, dass die Ummantelung nicht durch Reibung von den Spänen getrennt wird, ist ein zweistufiges Mischregime von Vorteil. Ein Vornässen der Späne mit einer definierten Wassermenge führt mit einem dreistufigen Mischregime zu einem erhöhten Aufwand, aber auch zu verbesserten Betoneigenschaften. Da auch die Wasseraufnahme der unbehandelten Holzspäne je nach Alter stark schwankt, ist die Wasseraufnahme für jede Charge erneut zu ermitteln.

Bei der Herstellung von Holzleichtbeton ist ebenfalls zu beachten, dass die Verarbeitbarkeitsdauer aufgrund der mit der Zeit steigenden Wasseraufnahme der Holzspäne begrenzt ist.

5. Betonentwicklung

Zur Einschätzung der erreichbaren Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Zement-, Blähglas- und Luftporengehalts wird die Zusammensetzung in mehreren Versuchsreihen variiert, um Mischungen mit reduzierter Wärmeleitfähigkeit bei ausreichender Festigkeit für die weitere Entwicklung zu identifizieren.

5.1. Erste Entwicklungsschritte im Labormaßstab

Bevor die Betonzusammensetzung betrachtet wird, wird zu Beginn der Mischungszusammensetzung die Abmischung der Blähglasfraktionen festgelegt.

5.1.1. Zusammensetzung der Gesteinskörnung

Die Zusammensetzung der Feststoffe wurde sowohl wie in [10, 22] mittels modifiziertem Andreasen-Modell als auch mittels BétonlabPro festgelegt. Die Übersicht der Anteile der einzelnen Fraktionen an der Zusammensetzung der Gesteinskörnung in Tabelle 5.1 und Abbildung 5.1 zeigt deutlich den Unterschied der beiden Modelle. Während bei der sieblinienbasierten Zusammensetzung Ausfallkörnungen nicht vorgesehen sind, entfällt bei der Zusammensetzung zu maximaler Packungsdichte gemäß CPM die Körnung 0,5/1 mm aufgrund der geringeren Packungsdichte dieser Fraktion. Da ein größeres Größtkorn zur Ausbildung eines Korngerüsts mit hoher Packungsdichte führt, ist der Anteil der Körnung 8/16 mm nach dem CPM deutlich höher zu wählen als nach dem modifizierten Andreasen-Modell.

Mit einer Sieblinienoptimierung lassen sich einfach und mit geringem Zeitaufwand Mischungsentwürfe mit guter Verarbeitbarkeit erstellen. Bei Hochleistungsbetonen wie Warmbetonen mit sehr niedriger Wärmeleitfähigkeit ist durch die Optimierung der Packungsdichte das volle Potential ausschöpfbar. Werden die einzelnen Fraktionen der Gesteinskörnung zu einer Mischung mit hoher Packungsdichte zusammengesetzt, ist bei gleichbleibender Frischbetonkonsistenz weniger Zementleim erforderlich. In der Folge ist die Herstellung von Betonen mit einem höheren Anteil an Gesteinskörnung möglich, womit Formänderungen des Festbetons entgegengewirkt wird [16]. Da die Gesteinskörnung die hohen Kriech- und Schwindverzerrungen reduziert, die bei solchen Betonen

Tabelle 5.1.: Packungsdichte bei sieblinien- und packungsdichteoptimierter Zusammensetzung der Gesteinskörnung im Vergleich

Blähglas		Mod. Andreasen-Modell	CPM
0,25/0,5 mm	[Vol. - %]	21,1	19,9
0,5/1 mm	[Vol. - %]	8,3	0
1/2 mm	[Vol. - %]	11,4	8,1
2/4 mm	[Vol. - %]	24,7	15,1
4/8 mm	[Vol. - %]	5,2	15,8
8/16 mm	[Vol. - %]	29,3	41,2
Packungsdichte g^*	[-]	0,8036	0,8237

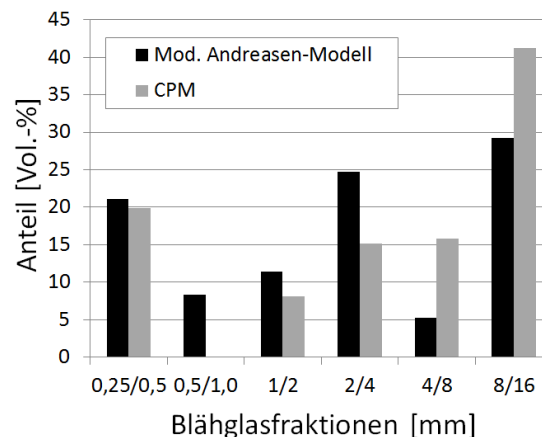


Abbildung 5.1.: Sieblinien- und packungsdichteoptimierte Zusammensetzung der Gesteinskörnung im Vergleich

aufzutreten, hat die Abstimmung der einzelnen Fraktionen aufeinander eine entsprechende Bedeutung. Deshalb wurde nach einem ersten Vergleich der Betoneigenschaften für die Gesteinskörnung die Zusammensetzung nach dem CPM mit der höheren Packungsdichte von $g^* = 0,8237$ verwendet.

5.1.2. Zusammensetzung des Bindemittels

Im Rahmen der ersten Laborversuche trat bei der Kombination eines CEM III/A 42,5 N mit Blähglas und Kalksteinmehl im Mischer plötzliches Erstarren auf, das nach [47] auf sehr reaktives C_3A im Zement zurückzuführen ist und durch eine auf den Zement abgestimmte Zugabe von Gips als Erstarrungsregler während der Zementherstellung zu verhindern ist. Bei der Verwendung eines zweiten CEM III/A 42,5 N traten dagegen keine Probleme auf, so dass dieser Zement für die weitere Entwicklung verwendet wurde.

Die Entwicklung der Zusammensetzung von Bindemitteln und Zusatzmitteln für das Erreichen geringer Betondichten und Wärmeleitfähigkeiten ist anhand der Festbeto-

neigenschaften in Tabelle 5.2 dargestellt. Die Zusammensetzungen der Betone sind im Anhang in Tabelle A.2 aufgeführt. Im Rahmen dieser Laborversuche ging es um ein Abschätzen der erreichbaren Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Weiterführende Untersuchungen wie die Kontrolle der Ergiebigkeit wurden zu diesem Zeitpunkt nicht durchgeführt.

Die ersten Mischungsentwürfe, Beton 1 bis 3 in Tabelle 5.2, enthalten Kalksteinmehl und Glasmehl als Zusatzstoffe, die folgenden Zusammensetzungen stattdessen gebranntes Tonmehl und Schleifstaub von Liaver. Beton 1 enthält Mikrohohlkugeln aus Kunststoff, die wie feste Luftporen wirken und folglich sowohl die Verarbeitbarkeit verbessern als auch die Dichte und Wärmeleitfähigkeit reduzieren. Diese gefügedichte Mischung weist zwar eine höhere Festigkeit auf als die mit Luftporenbildner versetzten Betone 2 – 8, die gemessene Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,261 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ liegt jedoch deutlich über der für die Ausbildung monolithischer Wandaufbauten angestrebten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_B = 0,147 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Mit der Zugabe von LP-Bildnern sinkt die Dichte auf $790 \text{ kg}/\text{m}^3$ (Beton 2), die Wärmeleitfähigkeit ist mit $0,251 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ jedoch nahezu unverändert hoch. Die Reduzierung des Gehalts an Kalksteinmehl in Kombination mit einem erhöhten Blähglasvolumen wirkt sich positiv auf die Wärmeleitfähigkeit aus (Beton 3). Der Austausch der Zusatzstoffe in der Weiterentwicklung von Beton 3 zu Beton 4 reduzierte die Trockenrohddichte um etwa $200 \text{ kg}/\text{m}^3$, zunächst allerdings bei gleichbleibender Wärmeleitfähigkeit und einem Festigkeitsverlust von 50 %. Mit einem höheren Luftporengehalt wurde mit Beton 5 bei ansonsten gleicher Zusammensetzung eine Verringerung der Wärmeleitfähigkeit auf $0,122 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ erreicht, die jedoch auch mit einem Einbruch der Festigkeit auf $1,1 \text{ N}/\text{mm}^2$ einhergeht. Durch die teilweise Substitution von Blähglas durch Aerogelgranulat mit vergleichbarer Partikelgröße wurden mit den Betonen 7 und 8 Warmbetone mit ausreichender Festigkeit von rund $5 \text{ N}/\text{mm}^2$ bei gleichzeitig sehr niedriger Wärmeleitfähigkeit von

Tabelle 5.2.: Trockenrohddichte, an Würfeln mit einer Kantenlänge von 15 cm ermittelte Druckfestigkeit und mittels THB-Verfahren gemessene Wärmeleitfähigkeit der ersten Mischungszusammensetzungen

Beton	Trockenrohddichte [kg/m^3]	Druckfestigkeit [N/mm^2]	Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
1	1070	14,2	0,261
2	790	9,9	0,251
3	730	9,8	0,167
4	535	4,8	0,175
5	470	1,1	0,122
6	490	5,8	0,111
7	510	5,9	0,116
8	470	5,6	0,116

0,111 W/(m · K) bzw. 0,116 W/(m · K) hergestellt. Die Druckfestigkeit ist damit doppelt so hoch wie die der Aerogelleichtbetone nach [146, 147], die Zugabe des Aerogelgranulats führt jedoch zu einem Ansteifen der Mischung. Die steifere Konsistenz erklärt auch das Ansteigen von Dichte und Wärmeleitfähigkeit von Beton 7 mit höherem Aerogelgranulatgehalt als Beton 6. Im Gegensatz dazu wird mit der Zugabe von Silikastaub (Beton 8) bei gleichzeitig guter Verarbeitbarkeit eine Druckfestigkeit von 5,6 N/mm² sowie eine niedrige Wärmeleitfähigkeit von 0,116 W/(m · K) erreicht.

5.1.3. Zusatzmittel

Der Einfluss des Mischregimes auf den in den Beton eingebrachten Luftporengehalt wurde in Leimversuchen betrachtet. Hierfür wurde jeweils ein LP-Bildner auf Tensidbasis und auf Harzbasis verwendet. Im Eirich-Intensivmischer erwiesen sich das Vorlegen der Feststoffe sowie die zweistufige Zugabe des Fließmittels als günstig, da die erzeugten Luftporen aus zu dünnflüssigen Bindemittelleimen entweichen. Während bei der Zugabe des Luftporenbildners auf Tensidbasis im LP-Topf ein LP-Gehalt von 20,5 Vol. – % gemessen wurde, betrug der LP-Gehalt bei der Verwendung des LP-Bildners auf Harzbasis lediglich 5 Vol. – %.

Die Struktur des porosierten Zementsteins in Abbildung 5.2 zeigt im Gegensatz zu den in Abbildung 3.1 dargestellten Mineralschäumen nur geringfügige und damit vernachlässigbare Unterschiede zwischen den verwendeten Luftporenbildnern an. In beiden Mischungen haben sich breite Stege zwischen den Poren gebildet, Öffnungen in der Porenwandung bilden sich so auch bei der Verwendung von LP-Bildner auf Tensidbasis lediglich vereinzelt aus. Nach [98] führt die Abmischung verschiedener Bindemittel infolge der gesteigerten Packungsdichte und Viskosität zur Ausbildung dickerer Porenwandungen. Zudem liegt der Feststoffgehalt der in Abbildung 5.2 gezeigten Schäume, deren Eignung zum Lastabtrag für die Herstellung von Warmbeton erforderlich ist, mit einer Trockenrohddichte von 700 kg/m³ deutlich über dem der in Abbildung 3.1 dargestellten Mineralschäume mit einer Trockenrohddichte von ca. 200 kg/m³. Mineralschaum mit der geringen Dichte von 200 kg/m³ wird als Wärmedämmmaterial eingesetzt.

In Folge des sukzessive reduzierten Zementgehalts und des erhöhten Luftporengehalts zum Erreichen der niedrigen Wärmeleitfähigkeit verlängerte sich die Erstarrungsdauer von zunächst unter 24 Stunden auf 7 Tage. Da insbesondere bei niedrigen Temperaturen mit einer weiteren Verzögerung der Erhärtung zu rechnen ist, ist eine Erstarrungsdauer von 7 Tagen nicht praxistauglich. Entsprechend wurden verschiedene Beschleuniger geprüft, mit denen die Verweildauer in der Schalung auf 3,5 Tage reduziert werden konnte. Eine höhere Beschleunigerdosierung bewirkt ein stabileres Luftporengefüge, was

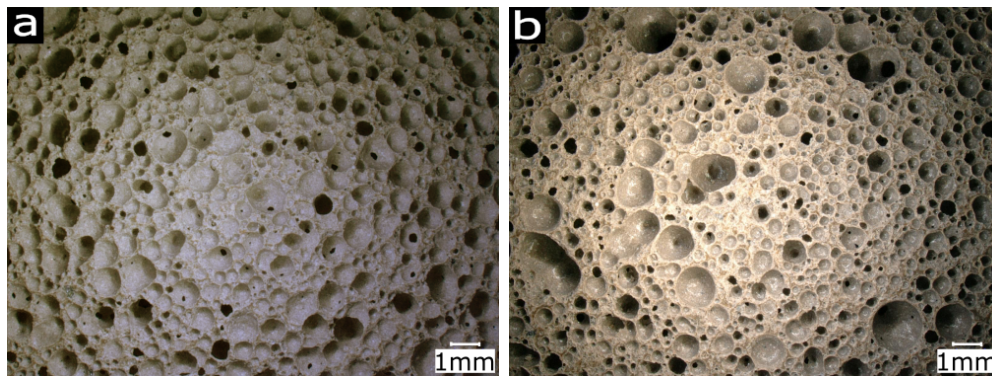


Abbildung 5.2.: Zwanzigfache Vergrößerung von mit LP-Bildner auf a) Tensidbasis und b) Proteinbasis porisiertem Zementstein des Warmbetons mit aufgrund des hohen Feststoffgehalts vergleichbarer Porenstruktur: geschlossene kleine Poren mit breiten Stegen

sich positiv auf die Trockenrohichte und die Wärmeleitfähigkeit auswirkt. Die Einhaltung der angestrebten Verarbeitbarkeitsdauer, die in der nächsten Entwicklungsstufe betrachtet wird, begrenzt jedoch die Beschleunigerzugabe.

Da der Warmbeton in Hinblick auf eine niedrige Wärmeleitfähigkeit entwickelt wird, eine Wasseraufnahme die Wärmeleitfähigkeit jedoch erhöht, wurden zusätzlich Hydrophobierungsmittel getestet. Um die Herstellung zu vereinfachen, wurde ein Compound gewählt, das sowohl hydrophobierend als auch beschleunigend und stabilisierend wirkt.

5.1.4. Identifizierung einer geeigneten Zusammensetzung für die Weiterentwicklung

Die Zusammensetzung von Beton 8 aus Tabelle 5.2 und Tabelle A.2 wurde in zwei aufeinanderfolgenden Versuchsreihen variiert, um eine geeignete Zusammensetzung für die beim Wechsel in die nächste Entwicklungsstufe durch größere Herstellmengen erforderlichen Anpassungen zu finden. Auch für diese Versuchsreihen wurde keine Kontrolle der Ergiebigkeit durchgeführt, da die Mischungsentwicklung noch nicht abgeschlossen war. In der ersten Versuchsreihe, zu der die Betone I bis IV in Tabelle 5.3 gehören, wurde das Verhältnis von gebranntem Tonmehl zu Schleifstaub verändert. Während Beton 8 gebranntes Tonmehl und Schleifstaub im Volumenverhältnis von 0,86 enthält, wird der Schleifstaubgehalt bei Beton I und II reduziert und entfällt bei der Herstellung von Beton III und IV gänzlich. Die Zusammensetzungen sind in Tabelle A.3 aufgeführt. Dabei fällt auf, dass der Schleifstaub an sich zwar eine niedrige Wärmeleitfähigkeit aufweist, ein reduzierter Schleifstaubanteil jedoch mit einem erhöhten Luftporengehalt einhergeht. Der Luftporengehalt des Frischbetons wurde mithilfe des LP-Topfs vergleichend bestimmt. An Beton IV, der keinen Schleifstaub enthält,

Tabelle 5.3.: Trockenrohddichte, an Würfeln mit einer Kantenlänge von 15 cm ermittelte Druckfestigkeit und mittels THB-Verfahren gemessene Wärmeleitfähigkeit der Warmbetone im Labormaßstab

Beton	Trockenrohddichte [kg/m ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m · K)]
I	455	4,7	0,111
II	425	5,0	0,114
III	435	5,1	0,114
IV	445	6,0	0,112
A	470	6,6	0,113
B	455	6,5	0,114
C	445	6,0	0,109
D	435	5,1	0,112

wurde mit $\lambda = 0,112 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit gemessen als an Beton 8 mit $\lambda = 0,116 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, so dass der Schleifstaub nicht weiter verwendet wird.

Da die Wärmeleitfähigkeit des Blähglases mit nur $0,07 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ angegeben wird, wird in der folgenden Versuchsreihe der Blähglasgehalt der Mischung von 63,1 Vol. – % (Beton IV) auf 69,4 (Beton D) erhöht. Der Blähglasgehalt der Betone ist wie die Zusammensetzung Tabelle A.3 zu entnehmen. Die Betone A bis D in Tabelle 5.3 zeigen mit steigendem Blähglasvolumen erwartbar sowohl eine sinkende Dichte als auch eine reduzierte Druckfestigkeit. Die Schwankungen der Wärmeleitfähigkeiten sind auf die Messung mit dem THB-Verfahren zurückzuführen. Die Messung an kleinen Flächen führt bei inhomogenem Material wie Beton zu Streuungen der Messwerte, je nachdem wie groß der Anteil an Blähglas bzw. Matrix in der Kontaktfläche zum Sensor ist. Mit einer vergrößerten Stichprobe ist nach abgeschlossener Betonentwicklung eine verlässlichere Angabe der Wärmeleitfähigkeit möglich. Beton D mit dem höchsten Blähglasgehalt und der niedrigsten Dichte lässt hierfür die niedrigste Wärmeleitfähigkeit erwarten, so dass diese Zusammensetzung für die zweistufige Herstellung im Suspensions- und Einwellenmischer gewählt wird. Dieser Wechsel der Entwicklungsstufe erforderte aufgrund der nun betrachteten zeitlichen Entwicklung der Verarbeitbarkeit zusätzlich zu den bereits verwendeten beschleunigenden und hydrophobierenden Zusatzmitteln den Einsatz eines Stabilisierers. Um unerwünschte Wechselwirkungen der verschiedenen Zusatzmittel zu vermeiden, wurde im Folgenden ein Compound verwendet, das sowohl stabilisierend und beschleunigend als auch hydrophobierend wirkt. Die Zusammensetzung des optimierten Warmbetons (vgl. Tabelle A.4) unterscheidet sich lediglich durch diese Zusatzmittel von Warmbeton D in Tabelle A.3.

Bei der Herstellung von 100l Beton zeigte sich deutlich, dass eine hohe Stabilisierer- und Beschleunigerdosierung sich zwar positiv auf die Stabilität der Luftporen in der

Suspension und damit auch auf die Wärmeleitfähigkeit auswirkt, aber ein zügiges Ansteifen des Betons zur Folge hat. Die Zugabemenge des stabilisierenden, beschleunigenden und hydrophobierenden Compounds wurde iterativ solange angepasst, bis eine Verarbeitbarkeitsdauer des Betons bis zu 3 Stunden nach Mischbeginn eingehalten wurde. An der so festgelegten Zusammensetzung wurden die Eigenschaften des Warmbetons umfassend ermittelt. Neben der Konsistenzentwicklung wurde die Entwicklung der Festbetoneigenschaften wie Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit und auch die optische Auswertung der Porengrößenverteilung sowohl am Leim als auch am Beton bestimmt. Hierfür wurden Probekörper verwendet, die direkt nach Mischende bzw. 1, 2 und 3 Stunden nach Mischbeginn hergestellt wurden. Zusätzlich wurden Zylinder zur Ermittlung des E-Moduls sowie für Kriechversuche hergestellt. Mit Untersuchungen des Schwindverhaltens sowie zum Einfluss der Umgebungstemperatur wurde zudem abgeschätzt, wie sich der Warmbeton bei der Übertragung vom Labormaßstab in den Realmaßstab verhält.

5.1.5. Herstellung im Intensivmischer

Für die erste Entwicklungsstufe wurde ein 10l Eirich-Intensivmischer genutzt (vgl. Abbildung 2.3 a). Im schrägstehenden rotierenden Mischbehälter werden die Ausgangsstoffe dem sich gegenläufig bewegenden Wirbler zugeführt. Dadurch erfolgt ein hoher Energieeintrag, der auch das Mischen von UHCP mit geringem Wassergehalt ermöglicht [29]. Verwendet wird der Stiftwirbler, dessen parallel zur Achse des Werkzeugs montierte Stifte im Vergleich mit dem Sternwirbler einen höheren Anteil der Motorleistung in die Mischung einbringen [27]. Da bei Blähglas aufgrund der geringen Kornfestigkeit bei der Verwendung von normalem Mischwerkzeug und zu hohen Mischgeschwindigkeiten Kornbruch auftreten kann [32], wird ein zweistufiges Mischregime gewählt. Bei einer Werkzeuggeschwindigkeit von 3 m/s ist ein guter Aufschluss der vorgelegten Feinstoffe mit Wasser und Zusatzmitteln möglich. Das Blähglas wird anschließend bei der niedrigsten Mischgeschwindigkeit von 0,8 m/s zugegeben. Da die Viskosität des Leims nicht ausreicht, um ein Entweichen der eingebrachten Luftporen zu verhindern, wird das Mischregime dahingehend angepasst, dass ca. 40% des Wassers in Stufe II mit der Gesteinskörnung zugegeben wird. Die Froude-Zahlen von 12,33 und 0,87 in den beiden Stufen des Mischregimes (vgl. Tabelle 5.4) lassen eine gute Übertragbarkeit auf die nächste Entwicklungsstufe erwarten. Die Maschinen-Froude-Zahl des Suspensionsmischers ist mit 38,44 höher als die des Intensivmischers, wodurch ein guter Aufschluss der Feinstoffe in der Suspension sichergestellt ist. Für das Homogenisieren von Suspension und Blähglas ist in der zweiten Mischstufe lediglich ein geringer Energieeintrag erforderlich. Da das Untermischen der leichten Gesteinskörnung im Intensivmischer bei der niedrigsten Mischgeschwindigkeit vorge-

Tabelle 5.4.: Eigenschaften der verwendeten Betonmischer im Vergleich

Mischer	Werkzeuggeschwindigkeit [m/s]	Froude-Zahl [-]	Schergradient [s ⁻¹]
Intensivmischer (Eirich RV01)	3,0 0,8	12,23 0,87	- -
Suspensionsmischer (MAT SC-50-K)	9,9	38,44	3300
Einwellenmischer (Elba EMS 60)	0,12	0,005	-
Suspensionsmischanlage (Obermann OM 800)	15,9	246,77	1060

nommen wurde, ist für den Einwellenmischer ebenfalls die niedrigste Werkzeuggeschwindigkeit mit der entsprechenden Froude-Zahl von 0,005 angegeben. Mit einer höheren Werkzeuggeschwindigkeit lässt sich die Mischdauer der zweiten Stufe reduzieren.

5.1.6. Zweistufige Herstellung im Suspensions- und Einwellenmischer

Während der weiteren Entwicklung wird die Suspension aufgrund des besseren Aufschlusses in einem Suspensionsmischer hergestellt und im Labormaßstab anschließend zunächst in einem Einwellenmischer mit dem Blähglas vermischt.

Die Kombination aus hohem Scherenergieeintrag und Pseudokavitation führt insbesondere bei feinen Partikeln mit einem Durchmesser $< 30 \mu\text{m}$, die zu Agglomeration neigen, zu einer hohen Mischgüte [27]. Auch wenn der Anteil dieser sehr feinen Partikel in der Zusammensetzung des Warmbetons nur 6,3 Vol. – % beträgt, ist der Bindemittelleim bei der Herstellung im Suspensionsmischer stabiler und enthält mehr Luftporen als beim Mischen im Eirich-Intensivmischer, was sich positiv auf die Wärmeleitfähigkeit des Betons auswirkt. Durch zusätzliches Einblasen von Luft während der Mischdauer des Leims konnte der LP-Gehalt erneut gesteigert werden. Mit dieser Maßnahme soll die Übertragbarkeit auf die Suspensionsmischanlage sichergestellt werden, da das Einblasen von Luft unabhängig von der Geometrie und Antriebsleistung des Mixers ist.

Bei der gewählten Mischgeschwindigkeit erfolgt im Einwellenmischer eine Schubbewegung des Mischguts, die für das Vermischen von Bindemittelleim und Gesteinskörnung ausreicht. Die bei der niedrigen Werkzeuggeschwindigkeit von 0,12 m/s auftretende Froude-Zahl von 0,005 zeigt, dass ein Vermischen von Suspension und Blähglas auch bei geringem Energieeintrag beispielsweise im Fahrmischer möglich ist.

5.2. Anpassung auf die Suspensionsmischanlage

Die Übertragung in den Realmaßstab erfolgt mit der abschließenden Anpassung der im Labor bestimmten Betonzusammensetzung auf den Produktionsmischer. Hierbei wird, soweit erforderlich, die Dosierung von Wasser und Zusatzmitteln geringfügig angepasst, um vergleichbare Betoneigenschaften einzustellen.

Erste Versuche in der Suspensionsmischanlage zeigten, dass der Leim nicht ausreichend viskos ist und in der Folge entlüftet. Das ist auf die fehlende Perforierung der Mischpaddel und den dadurch reduzierten Scherenergieeintrag zurückzuführen. Die Feinstoffagglomerate werden nicht vollständig auseinandergeschlagen, so dass sich auf der Oberfläche der Agglomerate ein dickerer Wasserfilm ausbildet als bei dem besseren Aufschluss im MAT-Suspensionsmischer. Wird der Leim in der Mischanlage mit 62,9 % des Anmachwassers hergestellt, ist die Fließfähigkeit mit der der Labormischung vergleichbar und das Einbringen von Luftporen mittels LP-Bildner möglich.

Im Labormaßstab war über das Einblasen von Druckluft in den Suspensionsmischer eine Steigerung des Luftporengehalts im Leim von 30 Vol. – % auf 50 Vol. – % möglich. Bei der Herstellung von 30l Leim im MAT-Suspensionsmischer wird dieser hohe Luftporengehalt innerhalb der üblichen Mischzeit erreicht. Werden in der Suspensionsmischanlage jedoch 750l gemischt, enthält der Leim bei einer Mischdauer von 15 Minuten nach Mischende lediglich 24 Vol. – % Luftporen. Diese lange Mischdauer bei der Herstellung von 750l ist dem Umstand geschuldet, dass etwa die Hälfte der Mischdauer für die händische Zugabe der Ausgangsstoffe benötigt wurde. Wird mit einer automatisierten Dosierung gearbeitet, ist eine kürzere Mischdauer möglich. Eine längere Mischdauer würde zwar zu einem höheren LP-Gehalt führen, ist jedoch zu vermeiden, wenn für monolithische Wandelemente mehrere Kubikmeter Beton herzustellen sind, um Schüttagungen zu vermeiden.

Wird beim Vermischen von Blähglas und Bindemittelleim jedoch zusätzlich Luftporenbildner zugegeben, so liegt der LP-Gehalt des Frischbetons nach Mischende mit ca. 23 Vol. – % in der gewünschten Größenordnung von > 20 Vol. – %. Dafür ist eine Zugabemenge von 0,88l LP-Bildner bezogen auf 1000l Beton ausreichend. Dieser in der zweiten Mischstufe des Warmbetons zugegebene LP-Bildner ist in der Zusammensetzung in Tabelle A.4 berücksichtigt. Da der geringere Luftporen- und Wassergehalt des Leims dessen Volumen verringert, ist für die Wirksamkeit des nachdosierten LP-Bildners und für das Erreichen einer guten Verarbeitbarkeit das Vormischen des Blähglases mit 16,4 % der ursprünglichen Zugabewassermenge erforderlich. Folglich beträgt die zuzugebende Wassermenge bei der zweistufigen Herstellung in Suspensionsmischanlage und Fahrsmischer 79,3 % der bei der Entwicklung im Labor benötigten Anmachwassermenge. Entsprechend enthält der Bindemittelleim bei der Herstellung in der Sus-

pensionsmischanlage einen geringfügig höheren Feststoffgehalt. Mit der Anpassung an die Suspensionsmischanlage gingen insgesamt jedoch nur geringfügige Änderungen von Zusammensetzung und Mischregime einher. Die Zusammensetzung des Warmbetons für Labor- und Realmaßstab sind in Tabelle 6.2 gegeben.

Nach der abschließenden Anpassung der Zusammensetzung auf die Suspensionsmischanlage wurden Probekörper zur Überprüfung von Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit hergestellt.

5.3. Anpassen der Verdichtung

Bereits bei den ersten Versuchen zeigte sich, dass sehr leichte Betone spezielle Anforderungen an die Verdichtung stellen. Für die Herstellung von Probekörpern zur Ermittlung der Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit wurde die Schwingbreite des Vibriertisches im Betonlabor am IWB erhöht, um ein fehlerstellenfreies Ausfüllen der Würfelschalungen mit dem Warmbeton zu erreichen. Auch die Frequenz war höher zu wählen als für Normalbeton und hochfeste Betone.

Sobald die Zusammensetzung des Warmbetons feststand und über die Zusatzmitteldosierung in der zweiten Entwicklungsstufe die Verarbeitbarkeitsdauer eingestellt wurde, wurde auch die Verdichtungswilligkeit an größeren Elementen mit einem Volumen von 72 l und der Abmessung 30 cm × 20 cm bei einer Höhe von 120 cm überprüft. Die Probekörper wurden stehend befüllt und auf dem Vibriertisch verdichtet. Da die Oberfläche der ersten auf dem Vibriertisch verdichteten Säule in der oberen Hälfte deutlich mehr Poren aufwies als in Bodennähe, wurde die Schwingbreite erneut erhöht, um eine gleichmäßige Betonoberfläche zu erhalten. Zusätzlich wurde eine Säule mit der Rüttelflasche von innen verdichtet, was zu sichtbaren Spuren ungleichmäßiger Verdichtung an der Oberfläche führte.

Deswegen wurden für die Verdichtung von Probewandelementen mit den Abmessungen 90 cm × 35 cm × 240 cm Außenrüttler gewählt. Abbildung 5.3 zeigt den Einfluss der Verdichtung auf die Oberflächenqualität dieser Probewände. Da im Labor zuvor mit einer Erhöhung der Schwingbreite die gewünschte Betonoberfläche erzielt wurde, wurden für das erste Probewandelement 5 von 8 möglichen Unwuchtscheiben in die Außenrüttler eingesetzt. Die Unwuchtscheiben bestimmen die auf die Schalung wirkenden Fliehkräfte und damit die Amplitude.

Bei der ersten Probewand führte das Befüllen der Schalung in vier Chargen zu Schichtbildung. In der Folge wurde die Frequenz von 3600 U/min auf 6000 U/min gesteigert. Um die Amplitude zu verringern, wurden dem Außenrüttler bis auf eine Unwuchtscheibe alle weiteren Scheiben entnommen. Dadurch verringert sich die an den Rüttlern wirkende maximale Fliehkraft von 0,78 kN, die von 5 Unwuchtscheiben

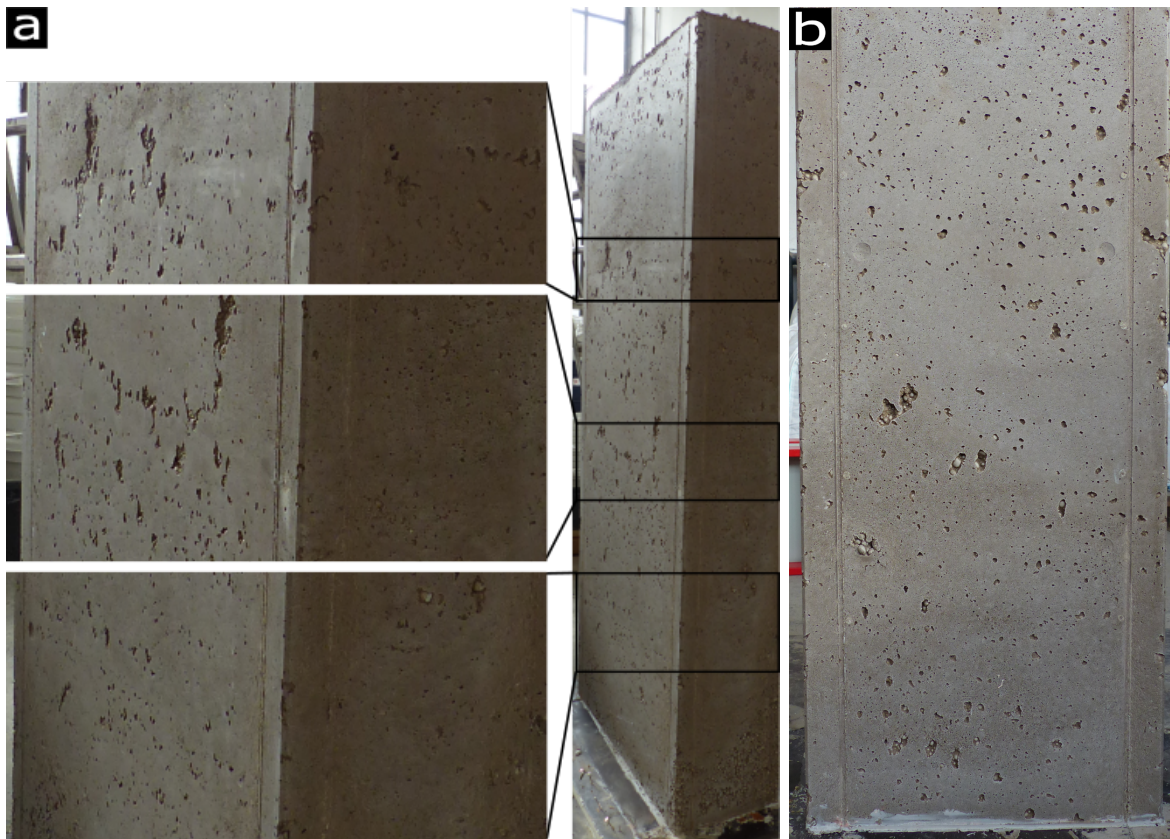


Abbildung 5.3.: Probewandelemente mit der Abmessung $90\text{ cm} \times 35\text{ cm} \times 240\text{ cm}$, a) Sichtbare Schüttlagen infolge mangelhafter Verdichtung und b) Oberfläche nach angepasster Verdichtung

bei 3600 U/min erzeugt wird, auf $0,44\text{ kN}$ bei 6000 U/min . Eine hohe Zentrifugalkraft führt zu einer großen Amplitude, die jedoch sowohl von einer höheren Betonmasse als auch einer höheren Frequenz stärker gedämpft wird. Das Verdichten mit einer aus der niedrigeren Fliehkraft und höheren Frequenz resultierenden niedrigeren Amplitude verhinderte bei der zweiten Probewand die Bildung von Schüttlagen.

6. Eigenschaften des entwickelten Warmbetons

Mit dem Wechsel zum zweistufigen Mischregime und dem Aufschäumen des Leims im Suspensionsmischer geht eine verbesserte Wirkung des LP-Bildners einher. In der Folge sinkt die Wärmeleitfähigkeit des Betons. Eine solche Verbesserung der Betoneigenschaften ist bei der Übertragung von kleinen Betonmischern auf größere Mischer des gleichen Typs die Regel. Nach [179] wird die verbesserte Verarbeitbarkeit bei der Herstellung in einem größeren Mischer durch die mit der steigenden Mischerbaugröße sinkenden Viskosität hervorgerufen.

Die Entwicklung von Luftporengehalt, Konsistenz, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit wurde für den vorgestellten Warmbeton jeweils bis zu 3 Stunden nach Mischbeginn betrachtet, um sowohl den Transportweg zur Baustelle als auch das Einbringen des Betons in die Schalung zu berücksichtigen.

Nach der Anpassung der Mischungszusammensetzung an den Suspensionsmischer und die Verarbeitungsdauer wurde die Ergiebigkeit überprüft. Da Luftporen im Frischbeton nicht vollständig volumenstabil sind, wurde der Luftporengehalt sowohl nach Mischende als auch 1, 2 und 3 Stunden nach Mischbeginn gemessen. Da der LP-Gehalt direkt nach Mischende für die Verwendung von Transportbeton nicht ausschlaggebend ist, wird die Betonzusammensetzung in Tabelle 6.1 für den Zeitraum zwischen 1 Stunde und 2 Stunden nach Mischbeginn angegeben. In diesem Zeitraum bleibt der Luftporengehalt des Frischbetons stabil. Mit der Anpassung der Bindemittelzusammensetzung und der Wahl eines geeigneten Mischregimes ging im Rahmen der Betonentwicklung eine Steigerung des Luftporengehalts einher. Entsprechend wurde der LP-Gehalt im Mischungsentwurf zunächst zu niedrig angesetzt. Dieser abgeschätzte LP-Gehalt ist neben dem im Versuch ermittelten und der daraus resultierenden tatsächlichen Zusammensetzung in Tabelle 6.1 angegeben.

Die auf einen Kubikmeter bezogenen Volumen- und Massenanteile der Ausgangsstoffe für die Herstellung in der Suspensionsmischanlage sind in Tabelle 6.2 angegeben. Infolge der in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen reduzierten Wassermenge bei der Herstellung in der Suspensionsmischanlage enthält der Warmbeton hierbei geringfügig mehr Binde- und Zusatzmittel.

Infolge des mit dem Verarbeitungszeitpunkt sinkenden LP-Gehalts geht ebenfalls ein erhöhter Feststoffgehalt einher. Die Veränderung der Zusammensetzung in Abhängigkeit des Verarbeitungszeitpunkts ist für die Herstellung in der Suspensionsmischanlage in Tabelle A.4 gegeben.

Tabelle 6.1.: Zusammensetzung des Warmbetons bei der Herstellung im Labormischer für einen Verarbeitungszeitraum zwischen 60 min und 120 min

	Mischungsentwurf		Mischversuch		Rückrechnung	
	Stoffraum [dm ³]	Masse [kg/m ³]	Stoffraum [dm ³]	Masse [kg/m ³]	Stoffraum [dm ³]	Masse [kg/m ³]
Zement	34,2	102,7	34,2	102,7	32,0	95,9
Gebanntes Tonmehl	21,6	58,2	21,6	58,2	20,1	54,3
Silikastaub	6,8	15,9	6,8	15,9	6,3	14,9
Wasser	65,9	65,9	65,9	65,9	61,5	61,5
Zusatzmittel	28,5	29,6	28,5	29,6	26,6	27,7
Luftporen	110		180		168	
Blähglas	734,6	250,2	663,1	250,2	685,7	233,5
Summe	1001	522,4	1071	522,4	1000	487,7

Tabelle 6.2.: Zusammensetzung des Warmbetons bei der Herstellung in der Suspensionsmischanlage für einen Verarbeitungszeitraum zwischen 60 min und 120 min

	Stoffraum [dm ³]	Masse [kg/m ³]
Zement	32,4	97,1
Gebanntes Tonmehl	20,4	55,0
Silikastaub	6,4	15,1
Wasser	49,3	49,3
Zusatzmittel	27,7	28,8
Luftporen	170,1	
Blähglas	694,2	236,4
Summe	1000	481,7

6.1. Frischbetoneigenschaften

Der Warmbeton soll leicht zu verarbeiten und verdichtungswillig sein. Gleichzeitig ist für die Stabilität sowohl der Luftporen als auch des sehr leichten Blähglases eine ausreichende Viskosität des Leims erforderlich, um ein Entlüften oder ein Aufschwimmen der Gesteinskörnung zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde eine weiche Konsistenz angestrebt.

Die Bewertung der Konsistenz von sehr leichtem Leichtbeton erfolgt über das Verdichtungsmaß. Aufgrund des geringen Eigengewichts ist das für weiche und fließfähige Normalbetone empfohlene Ausbreitmaß nicht aussagekräftig. Danach wäre der Warmbeton direkt nach dem Mischende trotz guter Verarbeitbarkeit mit einem Ausbreitmaß von 33 cm der Konsistenzklasse F1 zuzuordnen und als steifer Beton zu bewerten. Das bei Leichtbetonen aussagekräftigere Verdichtungsmaß bestätigt mit der Einordnung in die Konsistenzklasse C4 die weiche Konsistenz zu diesem Zeitpunkt. Tabelle 6.3 zeigt die sich mit zunehmender Verarbeitungszeit einstellende Konsistenzänderung des Warmbetons. Zwar ist das Ansteifen des Betons ohne Prüfung erst nach über 2 Stunden wahrnehmbar, doch das Verdichtungsmaß liegt bereits 2 Stunden nach Mischbeginn im Bereich der plastischen Konsistenz.

Die zeitliche Entwicklung der Konsistenzänderung lässt sich Abbildung 6.1 entnehmen. Es ist ein gleichmäßiges Fortschreiten des Ansteifens zu erkennen, das jedoch innerhalb des betrachteten Verarbeitungszeitraums unkritisch ist. Sowohl der zum Zeitpunkt von 3 Stunden nach Mischbeginn bereits um 5 Vol. – % gesunkene Luftporengehalt als auch das bei der Verarbeitung des Frischbetons wahrnehmbare Ansteifen deuten darauf hin, dass das Verdichtungsmaß bei der Prüfung zu einem späteren Zeitpunkt deutlich stärker ansteigen wird.

Tabelle 6.3.: Luftporengehalt und Konsistenz in Abhängigkeit der Verarbeitungsdauer

Zeit nach Mischbeginn	20 min	1 h	2 h	3 h
LP-Gehalt [Vol. – %]	21	18	18	16
Verdichtungsmaß [–]	1,01	1,05	1,12	1,16
Konsistenzklasse	C4	C3	C2	C2

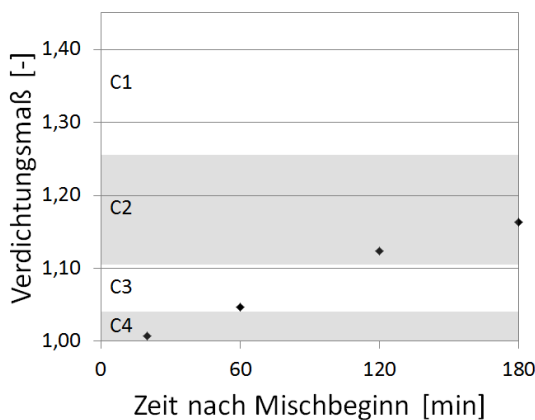


Abbildung 6.1.: Zeitliche Entwicklung der Konsistenz

6.2. Erstarrungsverhalten

Die Wärmeentwicklung von Beton und Bindemittelleim ist in Abbildung 6.2 vergleichend dargestellt. Der bei Messbeginn sehr hohe Wärmefluss sinkt mit dem Übergang in die Ruhephase der Hydratation, die bei der betrachteten Zusammensetzung bis 48 Stunden nach Mischbeginn anhält. Die Verarbeitbarkeit lässt bereits 3 Stunden nach Mischbeginn nach. Folglich findet der Erstarrungsbeginn bereits in der Ruhephase der Hydratation statt. Anschließend führt die fortschreitende Hydratation zu einem Ansteigen der gemessenen Wärmeentwicklung. Der zweite Peak des Wärmeflusses tritt im Beton rund 75 Stunden nach Mischbeginn auf und kennzeichnet den Zeitpunkt, ab dem der Beton eine zum Ausschalen ausreichende Festigkeit aufweist. Das Ablesen des Erstarrungsendes aus der Wärmeflussmessung ist also auf den Warmbeton übertragbar. Ab 140 Stunden nach Mischbeginn steigt der gemessene Wärmefluss durch die Aluminatreaktion bis knapp 172 Stunden nach Mischbeginn erneut an.

Nach [180] beeinflusst feine leichte Gesteinskörnung die Hydratation. Demnach reagiert in der leichten Gesteinskörnung enthaltenes Al und Si und wird in die sich bildenden CSH-Phasen eingebaut. Das verwendete Blähglas enthält 2 M. – % Al_2O_3 . Zusätzlich wird der im Beton enthaltene calcinierte Ton in der Blähglasherstellung als Trennmittel eingesetzt, haftet also auf der Oberfläche der Blähglaspartikel. Entsprechend ist der Aluminatpeak bei der Messung der Hydratationswärme im Beton ausgeprägter als im Bindemittelleim, vgl. Abbildung 6.2 Bild a. Zusätzlich führt der geringere Wärmefluss von Beton aufgrund der inerten Gesteinskörnung im Vergleich zu Zementleim zu einer leichten Verzögerung der Hydratationsreaktionen, so dass der zweite Peak 3,5 h später auftritt. Während der niedrigere Zementgehalt der Betonprobe die Wärmeentwicklung des Betons reduziert, ist die längere Dauer bis zum Erreichen der maximalen Temperatur nach [181] auf den Einfluss der Gesteinskörnung auf die Wärmeentwicklung zurückzuführen.

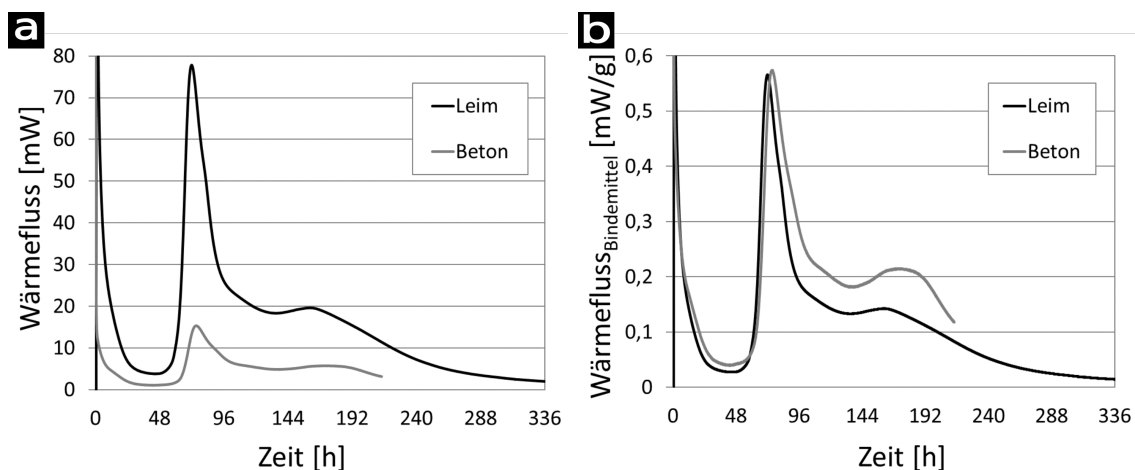


Abbildung 6.2.: Einfluss der Gesteinskörnung auf die Hydratationswärmeentwicklung

6.2.1. Einfluss der Umgebungstemperatur

Die Messungen der Hydratationswärme bei 5 °C, 10 °C, 20 °C und 30 °C sind in Abbildung 6.3 dargestellt und zeigen die bekannte Verzögerung des Hydratationsverlaufs bei niedrigen Temperaturen. Der zweite Hydratationspeak tritt bei 30 °C nach 38,7 Stunden auf und verschiebt sich von 75,4 Stunden und 89,5 Stunden bei 20 °C bzw. 10 °C auf 119,2 Stunden bei einer Temperatur von 5 °C.

Bei hohen Temperaturen führt der schnellere Hydratationsverlauf zu einer höheren Wärmeentwicklung. Die Betontemperatur des untersuchten Warmbetons steigt aufgrund des niedrigen Zementgehalts jedoch nicht in einen kritischen, zu Rissbildung führenden Bereich. Die Hydratationswärmeentwicklung des Warmbetons wurde an einer der Säulen mit der Abmessung von 30 cm × 20 cm × 120 cm überprüft (vgl. Abschnitt 5.3). Der mittig einbetonierte Temperaturfühler zeichnete dabei ein Temperaturmaximum von 26,3 °C auf.

Das allgemeingültige Formulieren eines Grenzwerts der Wärmeentwicklung ist nicht möglich. Sowohl Bauteilgeometrie als auch Betonzusammensetzung beeinflussen nicht nur die Hydratationswärmeentwicklung. Daneben ist das Auftreten von Rissbildung im jungen Beton infolge von Eigen- und Zwangsspannungen während der Festigkeits- und Steifigkeitsentwicklung möglich. Eine Temperaturdifferenz von 15 K bis 20 K zwischen Bauteilkern und Oberfläche wird jedoch als unkritisch betrachtet [182].

Auch bei einer Umgebungstemperatur von 30 °C erfolgt die Wärmeentwicklung über einen verhältnismäßig langen Zeitraum von 38,7 Stunden. Diese langsame Wärmeentwicklung verhindert das Auftreten von großen Temperaturgradienten zwischen Bauteilkern und -oberfläche.

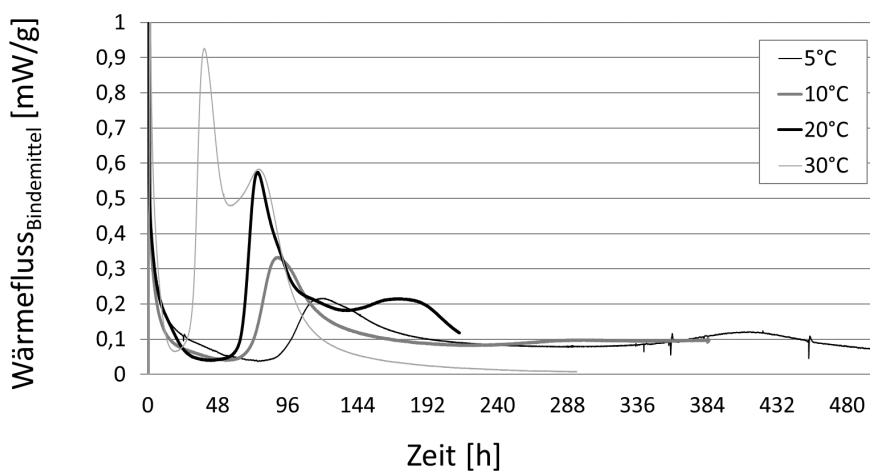


Abbildung 6.3.: Einfluss der Umgebungstemperatur auf den zeitlichen Verlauf der Hydratation

6.3. Festbetoneigenschaften

Die über den Verarbeitungszeitraum von bis zu 3 Stunden nach Mischbeginn betrachtete mittlere Dichte des Warmbetons liegt bei ca. 480 kg/m^3 . Die Druckfestigkeit beträgt nach 28 Tagen im Mittel $5,1 \text{ N/mm}^2$. Mit dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_B = 0,125 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ (vgl. Abschnitt 6.3.7) weist ein Außenwandbauteil mit einer Wandstärke von 50 cm zu einem U-Wert von $0,24 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ auf. Tabelle 6.4 zeigt eine Übersicht über die nachfolgend näher betrachteten Festbetoneigenschaften. Diese Festbetonkennwerte beschreiben die während der Mischungsentwicklung im Labormaßstab als Warmbeton D bezeichnete und an die Herstellung im Realmaßstab angepasste Zusammensetzung (vgl. Abschnitt 5.1.4). Während Festigkeit, E-Modul und Verbundspannung im Betonalter von 28 Tagen geprüft wurden, wurde sowohl das angegebene Schwind- als auch das spezifische Kriechmaß nach einer Beobachtungsdauer von einem Jahr ermittelt.

Tabelle 6.4.: Festbetoneigenschaften des entwickelten Warmbetons

	Warmbeton
Trockenrohddichte [kg/m^3]	480
Würfeldruckfestigkeit [N/mm^2]	5,1
E-Modul [N/mm^2]	2730
Verbundspannung (Glasfaserbewehrung, $d = 8 \text{ mm}$) [N/mm^2]	1,86
Schwindmaß [mm/m]	0,44
Spezifisches Kriechmaß [$(\text{mm/m}) / (\text{N/mm}^2)$]	0,154
Wasseraufnahmekoeffizient W_w [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$]	0,250

6.3.1. Druckfestigkeit und E-Modul

Die Druckfestigkeit des Warmbetons liegt nach 28 Tagen bei $5,1 \text{ N/mm}^2$. Tabelle 6.5 zeigt den Maßstabseinfluss auf die Betonfestigkeit. Bei der Herstellung von 91 und 901 Beton in den Labormischern wurde die Festigkeit in Abhängigkeit des Verarbeitungszeitpunkts bestimmt. Zu den angegebenen Zeitpunkten wurden jeweils zwei Würfelschalungen mit einer Kantenlänge von 15 cm befüllt. Zur Ermittlung der Druckfestigkeit bei der Herstellung in der Suspensionsmischanlage wurden 3 Würfel geprüft.

Für eine erste Betrachtung der Entwicklung über die Verarbeitungsdauer wurde Zementleim im Suspensionsmischer hergestellt und direkt nach Mischende sowie bis zu 3 h nach Mischbeginn stündlich die für das Mischen von 91 Beton erforderliche Menge entnommen, mit dem Blähglas vermischt und in die Schalungen gefüllt. Hierbei beeinflusst der Zeitpunkt der Probekörperherstellung die Betonfestigkeit nur geringfügig. Die ermittelten Druckfestigkeiten schwanken unabhängig vom Verarbeitungszeitpunkt um den über die Dauer bestimmten Mittelwert. Da ein Teil des Anmachwassers an der

Tabelle 6.5.: Einfluss aus Maßstab und Verarbeitungszeitpunkt auf die Würfeldruckfestigkeit des Warmbetons

Maßstab	Druckfestigkeit [N/mm ²]				
	Zeit nach Mischbeginn				Mittelwert
	20 min	1 h	2 h	3 h	
91	5,2	4,2	4,8	5,2	4,9
901	5,1	4,7	4,3	4,2	4,6
10001	5,1				

Oberfläche des Blähglases und dem dort anhaftenden Tonmehl gebunden wird, steift der Beton schneller an als der Bindemittelleim. Beim Herstellen von 901 Beton in der zweiten Entwicklungsstufe spiegelt sich das Ansteifen des Frischbetons in der mit der Verarbeitungsdauer sinkenden Druckfestigkeit. Bei gleichbleibender Verdichtung lassen sich die Probekörper nicht mehr mit fehlerstellenfreier Oberfläche herstellen. Dies führt trotz geringerem LP-Gehalt und in der Folge höherer Dichte zu niedrigeren Messwerten der Druckfestigkeit. Wird das schnellere Ansteifen des Frischbetons im Vergleich mit der Suspension bei der Mischungsentwicklung im Labor vernachlässigt, ist bei der Übertragung in den Realmaßstab der in Abschnitt 3.6 beschriebene Maßstabseffekt zu beobachten.

Der Einfluss des Verarbeitungszeitpunkts wurde vor dem Anpassen der Verdichtung geprüft, so dass der Mittelwert aufgrund unzureichender Verdichtung unter dem nachfolgend an mehreren Serien ermittelten Wert von 5,1 N/mm² nach 28 Tagen liegt, der mit einer höheren Schwingbreite des Vibriertischs trotz nachlassender Konsistenz während des betrachteten Verarbeitungszeitraums erreicht wurde. Diese Messwerte sind in Tabelle A.5 zur Ermittlung der charakteristischen Festigkeit dargestellt. Wie es für sehr leichte Leichtbetone üblich ist, entspricht diese Festigkeit bereits nahezu der Druckfestigkeit im Alter von 90 Tagen mit 5,3 N/mm² (vgl. Abschnitt 3.1.3), der E-Modul beträgt im Mittel 2730 N/mm². Trotz der schlechteren Deagglomerationswirkung in der Suspensionsmischanlage wird im Realmaßstab aufgrund des in der Folge reduzierten Wassergehalts eine gleichbleibende Druckfestigkeit von 5,1 N/mm² erreicht.

Die Herstellung und Erhärtung des Warmbetons bei einer Temperatur von 10 °C zeigte dagegen eine festigkeitssteigernde Wirkung. Die Druckfestigkeit bei einem mithilfe der Reifefunktion nach EC 2 [141] abgeschätzten wirksamen Betonalters von 28 Tagen liegt bei 5,4 N/mm². Bei gleicher Verdichtung lag der Mittelwert der Druckfestigkeit bei einer Lagerung der Probekörper bei 20 °C lediglich bei 4,6 N/mm².

Zur Berechnung der charakteristischen Festigkeit nach DIN EN 1520 [12] wurden die in Tabelle A.5 aufgeführten 15 Einzelmesswerte verwendet. Die daraus hervorgehenden Eingangswerte sowie die Ermittlung der charakteristischen Festigkeit sind

in Tabelle 6.6 zusammengefasst. Die charakteristische Festigkeit des Warmbetons beträgt $4,09 \text{ N/mm}^2$, die geforderte Mindestfestigkeit von $2,74 \text{ N/mm}^2$ wird von allen Einzelwerten eingehalten.

Da die Masse und damit Dichte der Probekörper durch Feuchteaufnahme und -abgabe von der Umgebung abhängt, wurde auch der Einfluss der Betonfeuchte auf den E-Modul betrachtet. Abbildung 6.4 zeigt die Mittelwerte der E-Moduln von zwei Prüfserien, die aus jeweils drei Zylindern bestehen. Die Probekörper wurden in einem Klimaschrank abwechselnd mit einer Luftfeuchte von 10 % und 80 % beaufschlagt. Die Schwankung der Messwerte wird vom Feuchtegehalt der Probekörper nicht beeinflusst. Die Standardabweichung der gezeigten Mittelwerte liegt bei 17,3 bzw. 19,0 für die bei 10°C und die bei 20°C hergestellten Zylinder. Die zeitliche Entwicklung des E-Moduls bis zu einem Alter von 12 Monaten wird in Abschnitt 6.4 betrachtet. Während die Druckfestigkeit der bei 10°C hergestellten Probekörper höher ist als die der bei 20°C hergestellten Probekörper, verhält es sich bei den in Abbildung 6.4 dargestellten E-Moduln entgegengesetzt. Eine mögliche Ursache für diese Abweichung ist die Verdichtung der Probekörper, die erst nach der Betrachtung einer verlängerten Verarbeitungsdauer auf die mit der Verar-

Tabelle 6.6.: Berechnung der charakteristischen Festigkeit des entwickelten Warmbetons nach den Vorgaben für haufwerksporigen Leichtbeton in DIN EN 1520 [12]

	Messwert	Referenzbauteil- probekörper
Mittelwert der Druckfestigkeit $[\text{N/mm}^2]$	5,1	4,4
Standardabweichung $[-]$	0,2199	0,1869
Anzahl n der Messwerte $[-]$		15
Statistischer Beiwert K_n $[-]$		1,48
Charakteristische Druckfestigkeit f_{ck} $[\text{N/mm}^2]$		4,09
Geforderte Mindestfestigkeit f_{min} $[\text{N/mm}^2]$		2,74

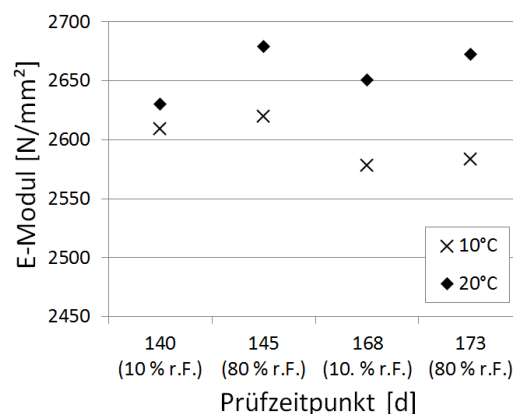


Abbildung 6.4.: Einfluss des Feuchtegehalts auf den E-Modul von bei 10°C und bei 20°C hergestellten Probekörpern

beitungszeit nachlassende Konsistenz des Frischbetons endgültig angepasst wurde. Entsprechend deutlich fällt bei den zum Überprüfen des Temperatureinflusses hergestellten Probekörpern der in Tabelle 6.5 betrachtete Verarbeitungszeitpunkt ins Gewicht.

6.3.2. Verbundspannung

Die maximale Verbundspannung zwischen dem Warmbeton und der Glasfaserbewehrung beträgt $1,86 \text{ N/mm}^2$ bei einem Schlupf von $0,05 \text{ mm}$. Wird Betonstahl mit demselben Durchmesser von 8 mm verwendet, steigt die maximale Verbundspannung auf $3,31 \text{ N/mm}^2$ bei einem Schlupf von $0,2 \text{ mm}$.

Die in Abbildung 6.5 dargestellten Verbundspannungs-Schlupf-Kurven des Warmbetons geben den für sehr leichte Leichtbetone charakteristischen geringen Schlupf beim Erreichen der maximalen Verbundspannung wieder. Abweichend vom ebenfalls abgebildeten Verbundmodell nach Hückler [150] ist der bei der maximalen Verbundspannung gemessene Schlupf bei der Verwendung von Glasfaserbewehrung geringer als bei der Verwendung von Stahl.

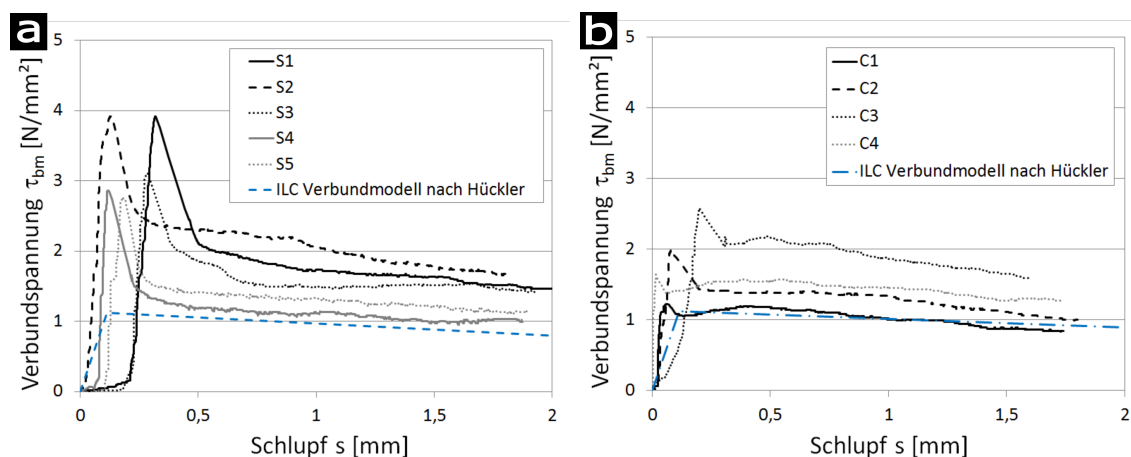


Abbildung 6.5.: Verlauf von Verbundspannung und Schlupf in Ausziehversuchen a) mit Betonstahl und b) mit Glasfaserbewehrung im Vergleich mit dem Verbundmodell für Warmbeton nach Hückler [150]

6.3.3. Schwindverhalten

Das aus zwei Messungen in Schwindrinnen bestimmte Endschwindmaß beträgt im Mittel $195 \mu\text{m/m}$. Abbildung 6.6, Bild a, zeigt die Längenänderung des Betons über die Messdauer von einem Jahr. Auffällig ist neben dem anfänglichen Quellen des Warmbetons das nachfolgend die Schwindverzerrung überlagernde gleichmäßige Quellen und Schwinden in Abhängigkeit der Umgebungfeuchte. Die gesamte Längenänderung, die der Beton vom Zeitpunkt des maximalen Quellens bis zu dem nach einem Jahr

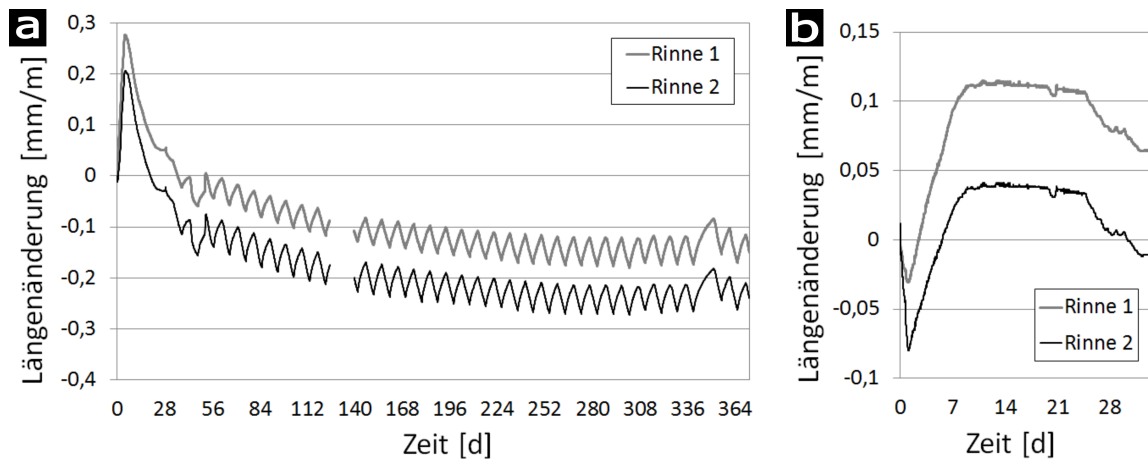


Abbildung 6.6.: Schwindmessung a) bei zyklischer Beaufschlagung mit 80 % bzw. 10 % Luftfeuchte und b) bei Beaufschlagung mit 6 % CO₂

ermittelten Schwindmaß erfährt, beträgt im Mittel aus beiden Messungen 440 $\mu\text{m}/\text{m}$ (vgl. Abbildung 6.6 a).

Bei Versuchen zum Einstellen der Erstarrungsdauer wurde das anfängliche Quellen durch eine Temperaturbeaufschlagung mit 40 °C stark vergrößert. Während mithilfe von Beschleunigern das Erstarrungsverhalten ohne negative Effekte eingestellt werden konnte, trat bei einer Hydratationsbeschleunigung mittels Wärmebehandlung Quellen auf. Die in Abschnitt 6.2.1 zusammengefassten Messungen der Hydratationswärme zeigen, dass das Erstarrungsende bei steigender Umgebungstemperatur deutlich schneller eintritt. An den direkt nach der Herstellung bei 40 °C gelagerten Probekörpern war ein starkes Quellen zu beobachten. Abbildung 6.7 zeigt das Quellen der Probekörper, das eine Größenordnung von 2 % bis 3 % aufweist. Diese Längen- bzw. Volumenänderung übertrifft die in den Schwindrinnen ermittelten Verformungen deutlich. Die Würfel mit einer Grundfläche von 150 mm \times 150 mm ragten im Anschluss an die Wärmebehandlung sichtbar über die Oberkante der Schalung hinaus.

Das anfängliche Quellen zeichnet sich auch in den in Abbildung 6.6 dargestellten Schwindmessungen ab. Allerdings beträgt die Längenänderung infolge Quellen mit weniger als 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ nur ein Hundertstel der mit der Wärmebehandlung aufgetretenen. Zudem wird sie in der Schwindmessung durch das sich anschließende Schwinden kompensiert.

Sowohl der Beton in den zum Schutz vor Austrocknen abgedeckten Schwindrinnen (Abbildung 6.6 a) als auch der in offenen Schwindrinnen bei 80 % Luftfeuchte und 6 % CO₂ im Klimaschrank gelagerte Beton (Bild b) quellen innerhalb der ersten Woche nach der Herstellung. Während das Quellen des offen gelagerten Betons bei 130 $\mu\text{m}/\text{m}$ abflacht, ist die Längenzunahme mit 246 $\mu\text{m}/\text{m}$ in den während der ersten 28 Tage abgedeckten



Abbildung 6.7.: Quellen der Probekörper infolge Wärmebehandlung (40 °C) zur Beschleunigung des Erstarrens

Schwindrinnen deutlich stärker ausgeprägt. Die ab dem Betonalter von 28 Tagen erfolgte wechselnde Beaufschlagung der Schwindrinnen mit hoher und niedriger Luftfeuchte von 80 % bzw. 10 % während jeweils 112 h führt zu gleichmäßigen Längenzunahmen und -abnahmen um ca. 55 $\mu\text{m}/\text{m}$, vgl. Tabelle 6.7.

In Tabelle 6.7 ist eine Übersicht der Minimal- und Maximalmesswerte der Schwindmessung in den letzten Wochen des Versuchszeitraums bei wechselnder Umgebungsfeuchte gegeben. Aus der Feuchtwechsellaagerung resultiert eine Bandbreite der Schwindverzerrungen zwischen 120 und 175 $\mu\text{m}/\text{m}$ bzw. zwischen 215 und 270 $\mu\text{m}/\text{m}$. Abbildung 6.6 zeigt, dass eine längere Beaufschlagung mit hoher Luftfeuchte in Woche 50 der Messung zu einer erhöhten Längenzunahme des Betons infolge erhöhter Feuchteaufnahme führt. In der Differenz der in den beiden Rinnen bestimmten Messwerte spiegelt sich die Abweichung, die in Abbildung 6.6 sowohl in Messung a als auch in Messung b in Abhängigkeit der verwendeten Schwindrinne sichtbar ist. Für die Charakterisierung und Anwendung des Warmbetons ist jedoch die Gesamtverzerrung von Bedeutung, die nach einem Jahr unabhängig von der verwendeten Schwindrinne 440 $\mu\text{m}/\text{m}$ beträgt. Auch die Feuchtwechsellaagerung führt unabhängig von der verwendeten Schwindrinne zu Längenänderungen von 55 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Um auszuschließen, dass die hygrischen Formänderungen des Warmbetons von den gewählten Ausgangsstoffen verursacht werden, wurden Messungen an Leim- und Mörtelprismen durchgeführt. Diese Prismen wurden mit verschiedenen Kombinationen der Ausgangsstoffe hergestellt und mit der gleichen wechselnden Luftfeuchte beaufschlagt wie der Beton in den Schwindrinnen. Das Quellen und Schwinden der Prismen ist für die Dauer von 63 Tagen in Abbildung 6.8 dargestellt. Bei den aus dem

Tabelle 6.7.: Einfluss der Luftfeuchte auf das Schwindmaß

	Rinne 1 [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Rinne 2 [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Mittelwert [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\Delta_{10\% \text{ r.F.}/80\% \text{ r.F.}}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]
10 % r.F.	175	270	223	55
80 % r.F.	120	215	168	
Mittelwert	148	243	195	

Bindemittelleim des Warmbetons hergestellten Prismen, die neben allen Zusatzstoffen auch die Zusatzmittel und damit einen hohen Luftporengehalt enthalten, ist das Quellen infolge hoher Luftfeuchte mit ca. 0,62 mm/m am stärksten ausgeprägt. Bei den Betonprismen wirkt das Korngerüst aus Blähglas stabilisierend und reduziert die Längenzunahme um rund 60 % auf 0,23 mm/m. Für diese vergleichende Messung am Beton wurde das Größtkorn auf 4 mm reduziert. Mit ca. 0,37 mm/m weisen die Prismen, die aus mit Zementleim verbundenem Blähglas bestehen, eine Längenzunahme infolge der Umgebungsfuchte auf, die zwischen der von Beton und Bindemittelleim liegt. Die weiteren Prismen, die jeweils Abmischungen des gebrannten Tonmehls bzw. der weiteren Zusatzmittel mit dem verwendeten Zement und Fließmittel enthalten, zeigen in erster Linie eine Verkürzung der Probekörper infolge von Schwinden. Einzig an den unter Verwendung von LP-Bildner hergestellten Zementleimprismen tritt in der ersten Hälfte des Beobachtungszeitraums bei hohen Luftfeuchten ein Quellen von rund 0,1 mm/m auf, das jedoch im weiteren Verlauf abnimmt.

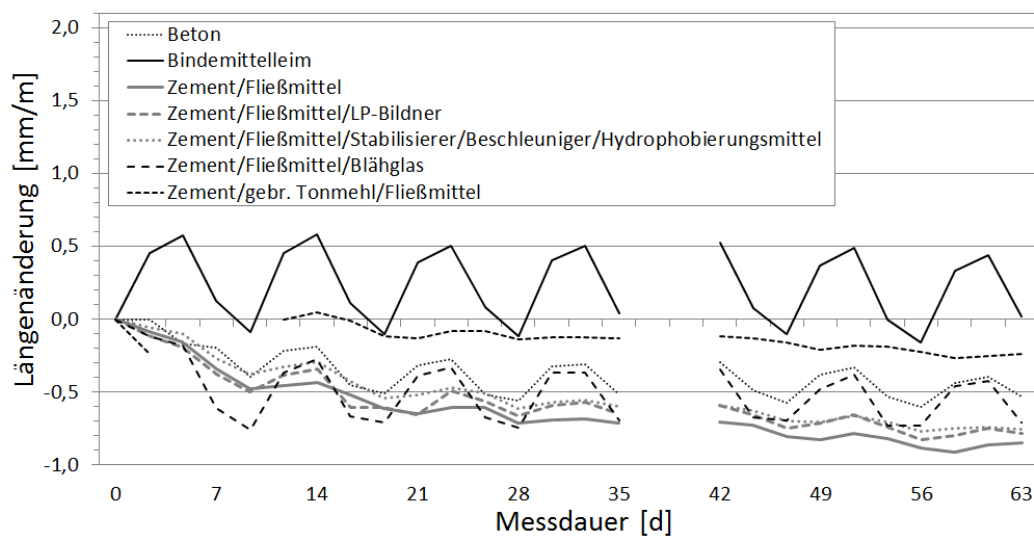


Abbildung 6.8.: Einfluss der Feuchtwechsellagerung bei 10 % r.F. und bei 80 % r.F. auf die Längenänderung von Leim- und Mörtelprismen unterschiedlicher Zusammensetzung

6.3.4. Kriechverzerrungen

Das Kriechverhalten wurde für den entwickelten Warmbeton (Warmbeton D2), für Porenbeton sowie für einen weiteren Warmbeton (Warmbeton E) untersucht. Warmbeton D2 zeichnet sich im Vergleich mit Warmbeton E durch eine höhere Druckfestigkeit bei gleichzeitig niedriger Wärmeleitfähigkeit aus. In Abbildung 6.9 sind die ermittelten Kriechverzerrungen dargestellt. Die niedrigere Kriechverzerrung von Warmbeton D2

bestätigt die Erwartung verbesserter mechanischer Eigenschaften bei gleichbleibend niedriger Wärmeleitfähigkeit nach abgeschlossener Betonentwicklung. Dies verdeutlicht die Bedeutung der Packungsdichte für die Herstellung leistungsfähiger Betone. Die im Versuch ermittelte Gesamtverformung ist zur Darstellung der Kriechverzerrung um die elastische Anfangsstauchung und das Schwinden bereinigt. Die elastische Anfangsstauchung ist in Tabelle 6.8 aufgeführt und beträgt für beide Warmbetone 0,7 mm/m. Da es während der Versuchsdauer von einem Jahr zu Ausfällen der Klimatisierung kam, werden die schwankenden Messwerte zum Schwinden nicht dargestellt.

Das in Abbildung 6.9 dargestellte Kriechmaß von Warmbeton D2 weist ab einem Alter von 175 d nur noch eine geringe weitere Zunahme auf und liegt nach einer Belastungsdauer von einem Jahr bei 0,254 mm/m (vgl. Tabelle 6.9). Das geringe Kriechvermögen von Porenbeton führt zu einem schnellen Abflachen der Kriechkurve, das bereits nach einer Belastungsdauer von 56 d beginnt.

Sowohl das Kriechmaß als auch das auf die Belastung bezogene spezifische Kriechmaß ist in Tabelle 6.9 zusammengefasst. Beide Werte von Warmbeton D2 liegen unterhalb der für den Porenbeton ermittelten Kennwerte. Während am Porenbeton eine höhere anfängliche elastische Verformung zu einer höheren Gesamtverformung während der Belastungsdauer führt, beträgt dessen spezifisches Kriechmaß bei vergleichbarer Gesamtverformung nur 31 % des mit 0,517 (mm/m) / (N/mm²) hohen spezifischen Kriechmaßes von Warmbeton E.

Tabelle 6.8.: Im Kriechversuch aufgetretene elastische Anfangsstauchung

	elastische Anfangsstauchung $\varepsilon_{el,t0}$ [mm/m]
Warmbeton D2	0,704
Warmbeton E	0,702
Porenbeton	0,901

Tabelle 6.9.: Kriechmaß und spezifisches Kriechmaß nach DAfStb-Heft 422 [157]

	Belastungsdauer t [d]	Kriechmaß $\varepsilon_{k,t}$ [mm/m]	spez. Kriechmaß <i>spez</i> $\varepsilon_{k,t}$ [(mm/m) / (N/mm ²)]
Warmbeton D2	175	0,206	0,125
	280	0,235	0,142
	364	0,254	0,154
Warmbeton E	269	0,481	0,517
Porenbeton	175	0,268	0,162

Abbildung 6.10 zeigt die Auswertung der Kriechverformung zur Ermittlung des Endkriechmaßes nach Ross [168]. Je stärker die Kriechverzerrung während des Versuchs

bereits abgeflacht ist (vgl. Abbildung 6.9), umso geringer wird die Differenz zwischen Kriechmaß und berechnetem Endkriechmaß. Dadurch, dass bei der Betrachtung der Regressionsgeraden die anfängliche Verformung aufgrund der geringen Dauer im Vergleich zur gesamten Belastungsdauer in geringerem Umfang berücksichtigt wird, liegt das in Tabelle 6.10 aufgeführte Kriechmaß der einzelnen Betone nach Ross deutlich näher beieinander als bei der Auswertung nach DAfStb-Heft 422, die damit den Einfluss der Betonzusammensetzung abbildet. Durch die Erhöhung des Blähglasgehalts um 5,9 Vol. – % im Rahmen der Weiterentwicklung von Warmbeton E zur optimierten Zusammensetzung von Warmbeton D2 wurde das Kriechmaß $\varepsilon_{k,308d}$ auf die Hälfte reduziert, das spezifische Kriechmaß auf 27 % (vgl. Tabelle 6.9).

Tabelle 6.10.: Kriechmaß und Endkriechmaß nach Ross [168] sowie Kriechzahl nach Model Code 2010 [167]

	Belastungsdauer t [d]	Kriechmaß nach Ross [–]	Endkriechmaß nach Ross [–]	Kriechzahl nach Model Code 2010 $\varphi(t, t_0)$ [–]
Warmbeton D2	175	0,918	0,951	1,292
	280	0,933	0,957	1,333
	364	0,948	0,971	1,361
Warmbeton E	269	1,193	1,278	1,685
Porenbeton	175	1,159	1,174	1,297

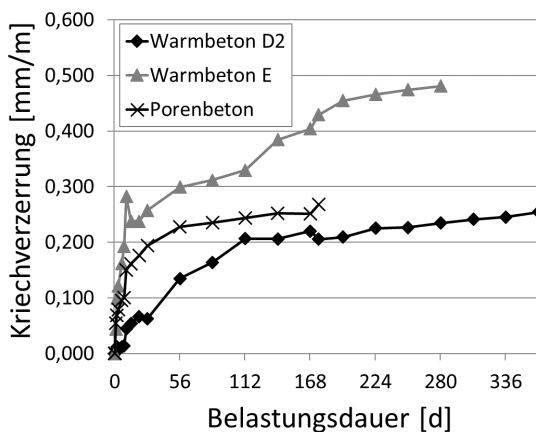


Abbildung 6.9.: Kriechverzerrung von Warmbeton und Porenbeton im Vergleich

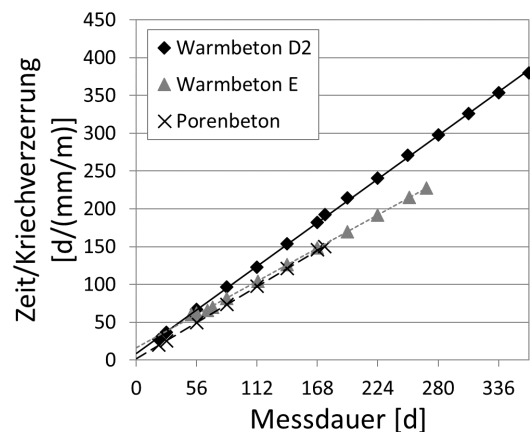


Abbildung 6.10.: Ermittlung des Endkriechmaßes nach Ross [168]

6.3.5. Porengrößenverteilung

Größe und Anteil der feinen Gel- und Kapillarporen im Zementstein hängen im wesentlichen von der Betonzusammensetzung ab. Mittels Quecksilberdruckporosime-

trie lassen sich Poren mit Durchmessern zwischen 10 nm und 100 μm vergleichsweise zuverlässig analysieren. In diesen Größenbereich sind die Kapillarporen einzuordnen.

Anteil der Kapillarporen

Die Porengrößenverteilung des Warmbetons ist in Abbildung 6.11 dargestellt. Aus dem Verlauf der Summenporenvolumenkurven und der differentiellen Ableitung lassen sich die relevanten Kennwerte zur Charakterisierung des Porengefüges bestimmen. Tabelle 6.11 zeigt eine Übersicht dieser ermittelten Porenstrukturkennwerte. Der Modalwert, der in der Abbildung die Lage des höchsten Peaks beschreibt, zeigt bei der niedrigeren Temperatur von 10 °C wie erwartet eine Verschiebung hin zu einem dichteren Zementstein und damit zu einem feineren Porengefüge. Ein zweiter Peak im Bereich der Poren mit Durchmessern zwischen 20 nm und 30 nm sowie die damit verbundene größere Steigung der Summenkurve bestätigen einen erhöhten Anteil an feinen Poren. Werden die Mörtelproben vor der Messung bei 105 °C getrocknet, ist ein größeres Porenvolumen erreichbar als bei einer Trocknung bei 70 °C.

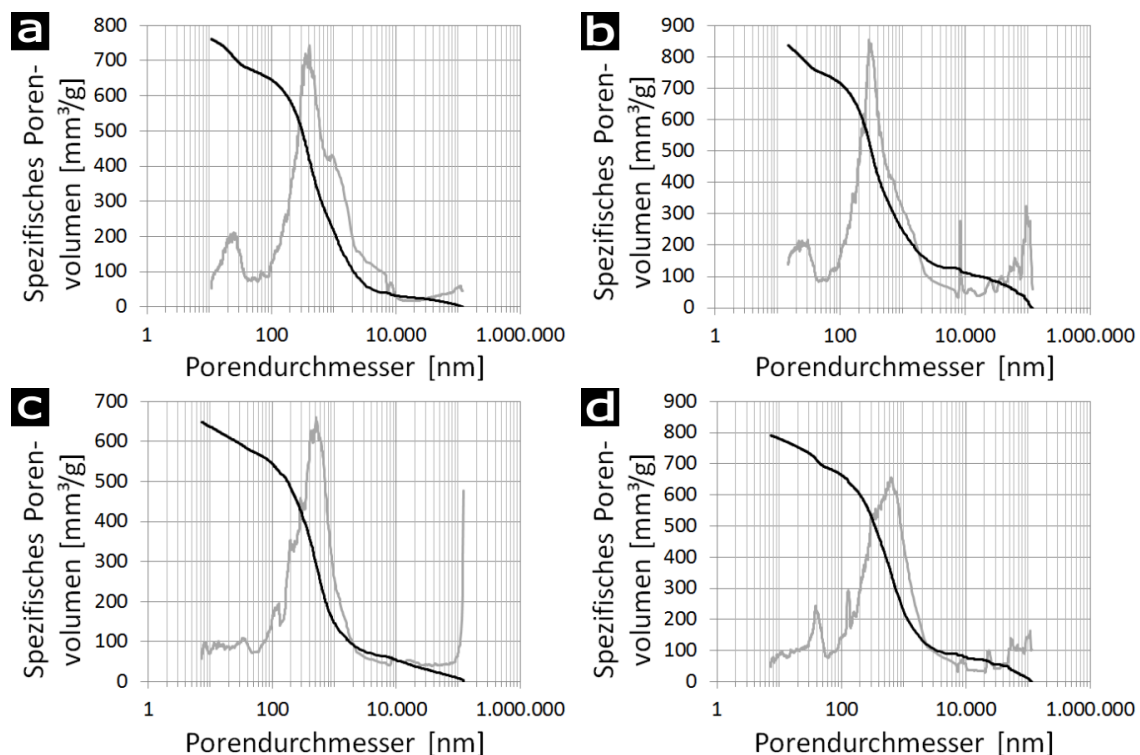


Abbildung 6.11.: Porengrößenverteilung mittels Quecksilberdruckporosimetrie in Abhängigkeit der Temperatur bei Herstellung und Lagerung sowie bei der Trocknung, a) 10 °C/70 °C, b) 10 °C/105 °C, c) 20 °C/70 °C und d) 20 °C/105 °C

Tabelle 6.11.: Porosität und Kennwerte der Porengrößenverteilung im Bereich zwischen 7 nm und 100 μm

Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]		Erreichbares Porenvolumen [%]	Porengrößen (Durchmesser)		
Herstellung und Lagerung	Proben- trocknung		Medianwert [nm]	Modalwert [nm]	Mittelwert [nm]
10	70	60,56	461,55	408,75	127,49
	105	62,03	414,32	289,62	147,17
20	70	48,66	459,19	510,54	106,09
	105	60,36	528,89	636,68	116,92

Während das Kapillarporenvolumen des Zementsteins bei der langsameren Erhärtung bei 10 $^{\circ}\text{C}$ und der Trocknung bei 105 $^{\circ}\text{C}$ um 1,7 % steigt, sinkt der Anteil der optisch ausgewerteten größeren Luftporen um 6,7 %.

Die vier in Abbildung 6.11 dargestellten Porengrößenverteilungen zeigen alle einen Anstieg der Messkurve im Bereich zwischen 10 μm und 100 μm , der besonders in Bild c auf einen hohen Anteil nicht messbarer Poren hinweist. In diesem Porengrößenbereich liefert die Quecksilberdruckporosimetrie keine verwertbaren Ergebnisse. Im Vergleich mit den weiteren Messkurven erklärt ein deutlich höherer Anteil an Poren, die sich auch ohne eine Steigerung des Messdrucks mit Quecksilber füllen und entsprechend mit der Messung nicht erfasst werden können, das geringere erreichbare Porenvolumen von nur 48,66 %.

Die in Abbildung 6.12 zur besseren Vergleichbarkeit auf 100 % normierten Summenkurven der Porengrößenverteilung weisen den Temperatureinfluss während der Probenvorbereitung auf. Die mit gestrichelten Linien dargestellten bei 105 $^{\circ}\text{C}$ getrockneten Messproben zeigen ein erhöhtes Porenvolumen im Bereich zwischen 1000 nm und 100 μm . Dieses erhöhte Kapillarporenvolumen ist mutmaßlich auf die hohe Temperatur während der Probenvorbereitung und die dadurch geschädigte Gelstruktur zurückzuführen. Im Vergleich der bei 70 $^{\circ}\text{C}$ getrockneten Betonproben fällt auf, dass die niedrigere Temperatur von 10 $^{\circ}\text{C}$ bedingt durch das langsamere Erstarren des Betons ein Zusammenfallen der feinen Luftporen über einen längeren Zeitraum nicht verhindert. In der Folge enthält der Zementstein einen geringeren Anteil an Poren im oberen Messbereich zwischen 2 μm und 100 μm .

Optische Auswertung der Luftporen

Luftporengehalt und Porengrößenverteilung der Luftporen verändern sich im Frischbeton über die Verarbeitungsdauer. Die Bilder a–d in Abbildung 6.13 zeigen das Zusammenfallen der anfangs gleichmäßig feinen Luftporen (vgl. Bild a) zu unregelmäßig verteilten, größeren Luftporen (vgl. Bild d). Die linke Bildhälfte zeigt jeweils das Kontrastbild zur Auswertung der Porengrößenverteilung, die rechte das mit Streiflicht unter dem Mikro-

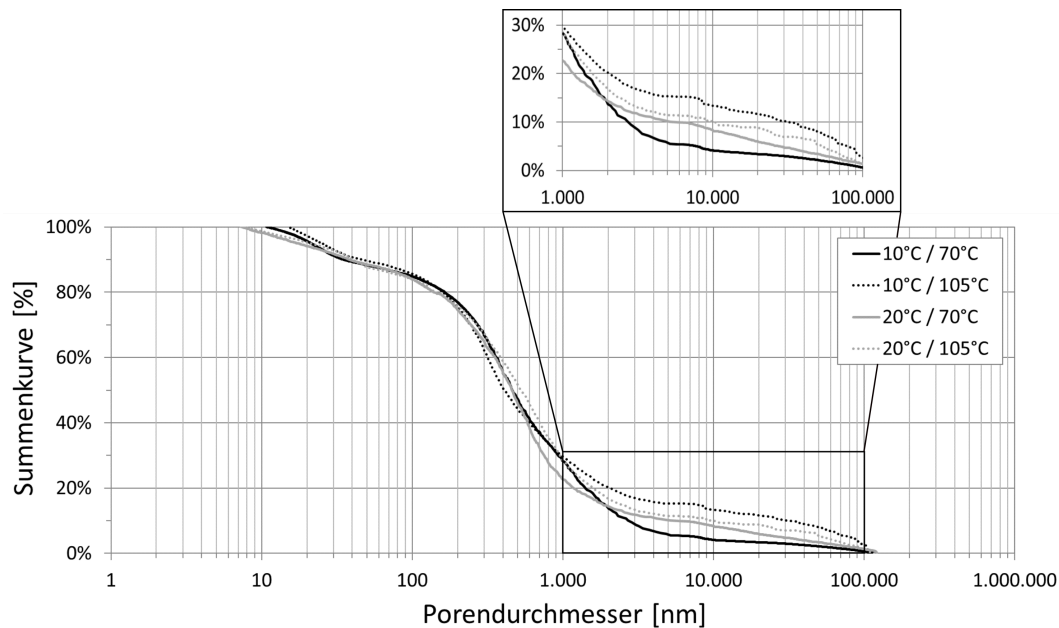


Abbildung 6.12.: Summenkurven der Porengrößenverteilung mittels Quecksilberdruckporosimetrie in Abhängigkeit der Temperatur bei Herstellung und Lagerung sowie bei der Trocknung

skop aufgenommene Foto (vgl. Abschnitt 4.2.4). Der an der Schnittfläche auswertbare Luftporengehalt des Zementsteins sinkt innerhalb von 3 h um knapp 5 % auf 48,4 %. Auch in der in Abbildung 6.15, Bild I, dargestellten Porengrößenverteilung ist für die Verarbeitung 3 h nach Mischbeginn die Tendenz einer Verschiebung hin zu größeren Poren sichtbar.

Im Vergleich dazu zeigt der Zementstein des Warmbetons (vgl. Abbildung 6.13, Bilder e–h) durch das Vermischen mit dem Blähglas von Beginn an eine unregelmäßige Porenstruktur. Der Luftporengehalt liegt innerhalb der ersten beiden Stunden in der gleichen Größenordnung, anschließend ist das zunehmende Ansteifen und der sinkende LP-Gehalt des Frischbetons auch an der Schnittfläche des Festbetons sichtbar. Die Auswertung von Abbildung 6.13, Bild h, ergibt einen LP-Gehalt von nur 42,7 %.

Neben der Veränderung des Zementsteins infolge zusammenfallender und entweichender Luftblasen wurde der LP-Gehalt des Betons im Mittel über die Verarbeitungsdauer von 3 h mit 45,9 % und der des Blähglases mit 39,8 % bestimmt. Für die Ermittlung der Porengrößenverteilung des Blähglases wurden ebenfalls vier Aufnahmen ausgewertet, auch wenn kein zeitlicher Einfluss besteht. Abbildung 6.14 zeigt beispielhaft jeweils eine Aufnahme zur Auswertung der gesamten Schnittfläche bzw. der Gesteinskörnung. Der mit 39,8 % niedrige Luftgehalt des Blähglases zeigt die Grenzen der optischen Porengrößenbewertung auf, da Poren mit einem Durchmesser $< 170 \mu\text{m}$ nicht erkannt werden und der Luftgehalt in der Folge unterschätzt wird. Der in Abbildung 6.15, Bild II, dargestellte Vergleich der Porengrößenverteilung zeigt dennoch deutlich, dass

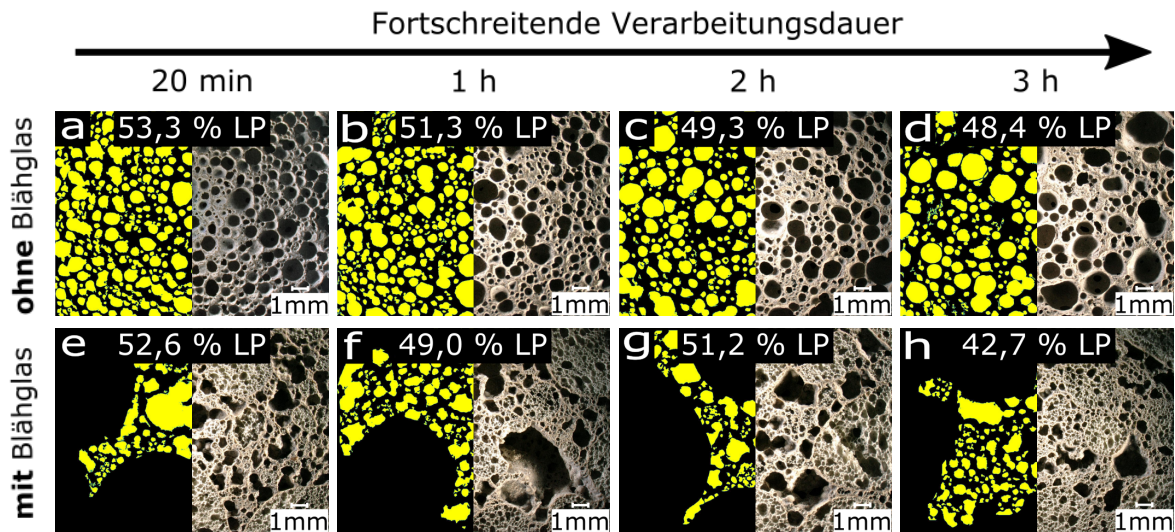


Abbildung 6.13.: Luftporengehalt und Luftporen des Zementsteins ohne (a–d) und mit Zugabe von Blähglas (e–h), zwanzigfach vergrößert, in Abhängigkeit des Verarbeitungszeitpunkts nach Mischbeginn: a+e) 20 min, b+f) 1 h, c+g) 2 h und d+h) 3 h

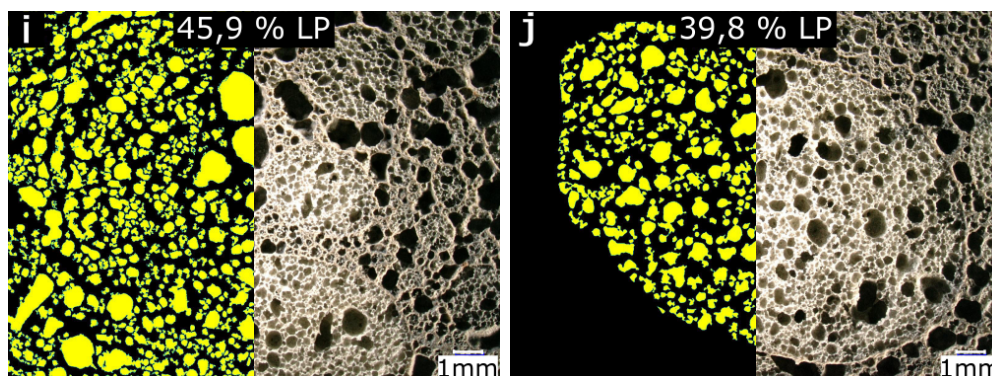


Abbildung 6.14.: Luftporengehalt und Luftporen i) des Betons über die gesamte Schnittfläche und j) des Blähglases

das Blähglas (Kurve j) feinere Poren enthält als der Beton (Kurve i), dessen Summenporenvolumenkurve aufgrund des enthaltenen Blähglases im Größenbereich der Luftporen zwischen der von Blähglas und der von Zementstein liegt.

Mit dem Vergleich der Porengrößenverteilung von bei 10 °C hergestelltem und erhärtetem Beton mit bei den bei der Betonentwicklung im Labor üblichen 20 °C während Herstellung und Erhärtung ist in Abbildung 6.15, Bild III, der Temperatureinfluss auf die Porenstruktur dargestellt. Bei niedrigen Temperaturen bilden sich feinere Poren. Der Luftgehalt an der Schnittfläche der Probekörper liegt jedoch bei lediglich 42,2 % anstelle von 48,9 % bei der Herstellung und Erhärtung bei 20 °C. Das verzögerte Erstarren bei niedrigen Temperaturen ermöglicht das Zusammenfallen und Entweichen der Luftporen über einen längeren Zeitraum.

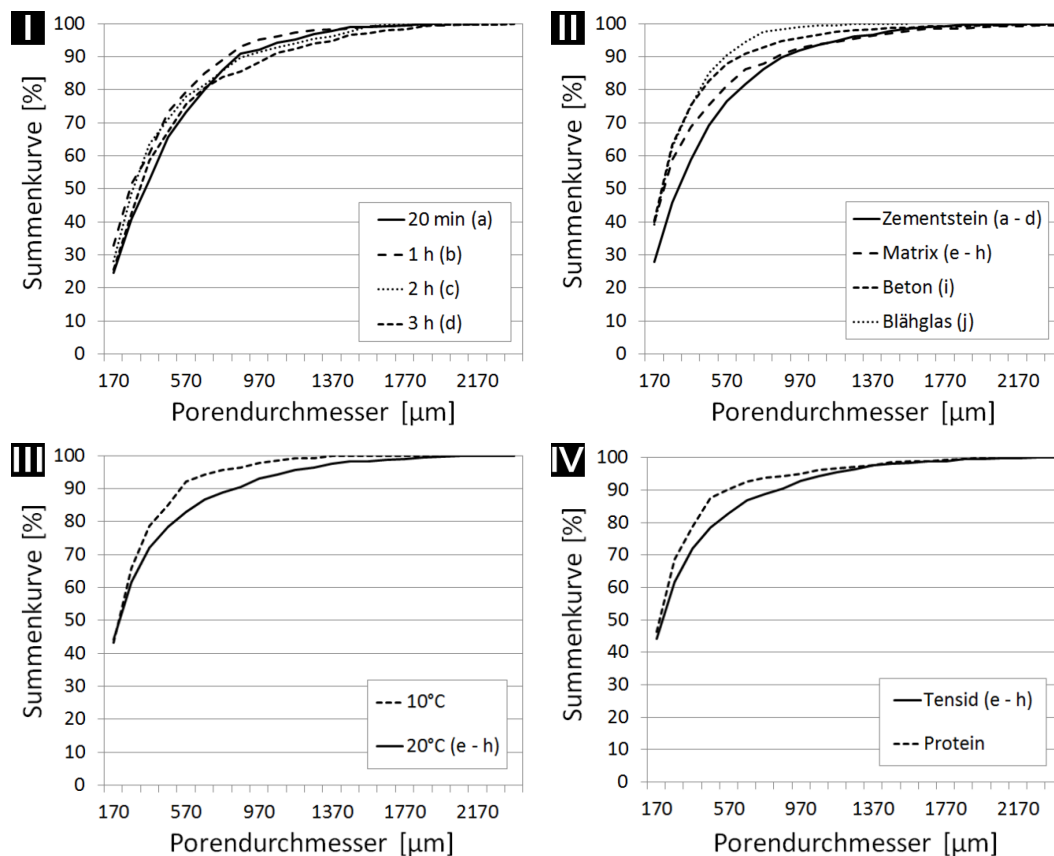


Abbildung 6.15.: Aus den Kontrastbildern ermittelte Porengrößenverteilung I) des Zementsteins in Abhängigkeit des Verarbeitungszeitpunkts (Abb. 6.13 a–d), II) Vergleich von Zementstein (Abb. 6.13 a–d und e–h), Beton und Blähglas (Abb. 6.14), III) in Abhängigkeit der Temperatur während Herstellung und Lagerung und IV) bei der Verwendung von LP-Bildner auf Tensid- und Proteinbasis

Über Luftporenbildner in Beton eingebrachte Luftporen sind nach [113] Mikrokugeln, die überwiegend einen Durchmesser zwischen $10\ \mu\text{m}$ und $100\ \mu\text{m}$ aufweisen. Der Warmbeton enthält jedoch mit ca. 50 % einen hohen Anteil an größeren Luftporen, die optisch auswertbar sind. Abbildung 6.15, Bild IV, zeigt in diesem Bereich einen deutlichen Einfluss der Art des verwendeten Luftporenbildners auf die Größe der Luftporen. Zudem schließen sich die feinen Mikroluftporen mit zunehmender Verarbeitungsdauer zu größeren Luftporen zusammen. Im Gegensatz zu der für Proteinschäume dokumentierten groben Porenstruktur (vgl. Abbildung 3.1) wurde an den mithilfe eines Proteinschaumbildners porierten Probekörpern im Vergleich eine feinere Porengrößenverteilung ermittelt als an dem unter Verwendung eines LP-Bildners auf Tensidbasis hergestellten Beton.

Auch wenn der Luftgehalt der mit Proteinschaum porierten Matrix mit 50,3 % hoch ist, spiegeln sich die Stabilitätsprobleme des Frischbetons in der ungleichen Verteilung der Luftporen über den Querschnitt der Probekörper. Da die Entlüftung über die Ober-

fläche stattfindet, enthält die obere Hälfte des Probekörpers sichtbar mehr und größere Luftporen als die untere Hälfte. Ohne die Zugabe von Blähglas wird die Instabilität des mit Proteinschaumbildner aufgeschäumten Leims noch deutlicher. Das Zusammenschließen der Luftporen zu großen Poren, die aufsteigen, ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Diese große Abweichung des Luftporengehalts von 12 % über den Querschnitt wurde an einem direkt nach Mischende hergestellten Würfel mit einer Kantenlänge von 10 cm gemessen. Aufgrund dieser Stabilitätsprobleme wurde die zeitliche Entwicklung des Luftporengehalts bei der Verwendung von Proteinschaumbildner nicht untersucht. Bei der Verwendung des LP-Bildners auf Tensidbasis weisen die Probekörper einen konstanten LP-Gehalt über den Würfelquerschnitt auf und sinken über den in Abbildung 6.13, Bilder a–d betrachteten Verarbeitungszeitraum von 3 h von 53,5 % auf 48,4 %.

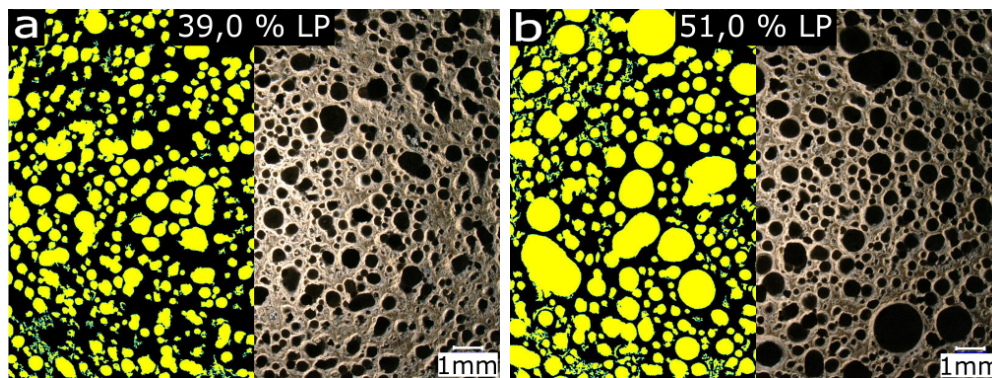


Abbildung 6.16.: Instabiler Luftporengehalt bei Verwendung von Proteinschaumbildner a) Luftporen der unteren Probekörperhälfte und b) der oberen Probekörperhälfte

6.3.6. Feuchtesorption

Die in Abbildung 6.17 dargestellten Sorptionsisothermen zeigen weder einen signifikanten Einfluss aus der Umgebungstemperatur während der Hydratation noch aus der Probenvorbereitung. Alle Adsorptionsthermen weisen bei relativen Luftfeuchten über 50 % eine stärker ansteigende Massenzunahme auf. Einzig die Adsorptionisotherme der bei 70 °C getrockneten Probe in Abbildung 6.17 a weicht bei sehr hohen relativen Luftfeuchten über 90 % von den anderen Adsorptionisothermen ab. Die maximale Massenzunahme der Warmbetonmatrix ist in Tabelle 6.12 zusammengefasst und verdeutlicht, dass die beiden zur vorbereitenden Probentrocknung gewählten Temperaturen die Wasserdampfsorption nicht beeinflussen.

Die Desorptionisothermen geben erst bei niedrigen relativen Luftfeuchten unter 10 % eine deutliche Massenabnahme wieder. Dennoch verbleiben bei der gewählten Messdauer ca. 2 M. – % Feuchte in den Proben. Ad- und Desorptionisothermen weichen bei

50 % r.F. mit knapp 5 M. – % am weitesten voneinander ab. Die Hysterese verdeutlicht, dass die Desorption verzögert abläuft und möglicherweise bei Versuchsende noch nicht abgeschlossen war.

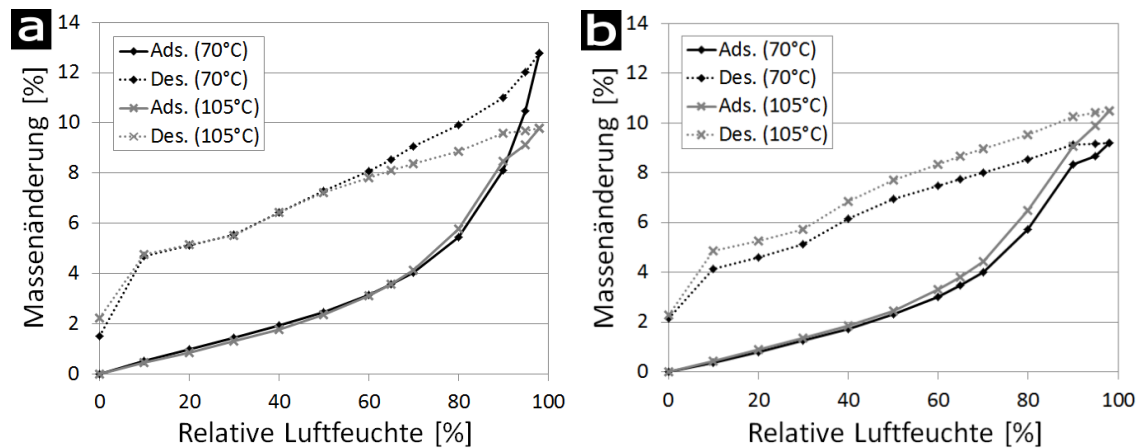


Abbildung 6.17.: Adsorption und Desorption der bei a) 10 °C und b) 20 °C erhärteten und zur Vorbereitung für die Wasserdampfadsorption bei 70 °C bzw. 105 °C getrockneten Betonproben

Tabelle 6.12.: Maximale Massenzunahme der Matrix infolge Wasserdampfadsorption

Temperatur [°C]		Massenzunahme [%]
Betonherstellung	Probentrocknung	
10	70	12,8
	105	9,8
20	70	9,2
	105	10,5

6.3.7. Wärmeleitfähigkeit

Die im Versuch bestimmten Messwerte der Wärmeleitfähigkeit werden zu Mittelwerten zusammengefasst, die Nenn- und Bemessungswerte wurden nach DIN EN ISO 10456 [76] berechnet und auf die nächsthöheren 0,005 W/(m · K) gerundet (vgl. Abschnitt 4.2.6). Der Messwert der Wärmeleitfähigkeit liegt über die Verarbeitungsdauer gemittelt bei 0,108 W/(m · K), der Bemessungswert bei 0,125 W/(m · K). Tabelle 6.13 zeigt die Aufschlüsselung der Messungen auf Probekörper, die nach dem Herstellzeitpunkt zusammengefasst wurden. Dass Messungen an Beton, der 2 h nach Mischbeginn beprobt wurde, eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als die an den direkt nach Mischende und 1 h nach Mischende hergestellten Probekörpern ermittelte, ist auf die Entnahme kleiner Teilmengen und die Materialinhomogenität zurückzuführen. Die Messwerte sind für einen Verarbeitungszeitraum von 2 h annähernd konstant. Erst

Tabelle 6.13.: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Verarbeitungsdauer

Wärmeleitfähigkeit [W/(m · K)]		Zeit nach Mischbeginn			
		20 min	1 h	2 h	3 h
Messwert	$\lambda_{tr,10}$	0,106	0,108	0,105	0,116
Nennwert	λ_D	0,120	0,120	0,115	0,135
Bemessungswert	λ_B	0,125	0,125	0,120	0,140

die 3 h nach Mischbeginn hergestellten Probekörper zeigen mit einem Mittelwert von 0,116 W/(m · K) deutlich höhere Messwerte der Wärmeleitfähigkeit. Neben der Trockenrohddichte der Probekörper, an denen die Wärmeleitfähigkeit ermittelt wurde, ist in Tabelle 6.14 zusätzlich der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit bei der Herstellung kleiner Mengen im Laborintensivmischer und von 1000l Beton in der Suspensionsmischanlage zusammengefasst.

Weder das Anpassen der Verdichtung noch die Herstellung und Erhärtung bei 10 °C wirken sich auf die Wärmeleitfähigkeit des Betons aus, so dass diese Messwerte nicht gesondert aufgeführt werden. Lediglich der mit Proteinschaumbildner porierte Warmbeton zeigt mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_B = 0,135$ W/(m · K) auch an direkt nach Mischende hergestellten Probekörpern eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit. Hier führt die Abweichung des Luftporengehalts über den Probekörperquerschnitt (vgl. Abbildung 6.16) zu einer erhöhten Standardabweichung der einzelnen Messungen, die in die Berechnung des Nenn- und Bemessungswertes der Wärmeleitfähigkeit eingeht. In der Folge steigt die Differenz zwischen Messwert und Bemessungswert.

Die in Tabelle 6.15 aufgeführten Werte der Wärmeleitfähigkeit des porierten Zementsteins zeigen mit 0,170 W/(m · K), 0,171 W/(m · K) und 0,174 W/(m · K) einen geringeren, weniger sprunghaften Anstieg der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Verarbeitungsdauer. Entsprechend ist bei der Herstellung von nur 9l Beton im Labor das Herstellen von Probekörpern mit gleichbleibenden Eigenschaften möglich, wie sie in Tabelle 6.14 zusammengefasst sind. Die bereits bei der Herstellung von 90l Beton und einer Verarbeitungsdauer von mehr als 2 h ansteigende Wärmeleitfähigkeit und Rohddichte zeigen einen Maßstabseinfluss an. Dieser Effekt wird bei der Herstellung von 1000l Beton mit dem steigenden Betonvolumen zunehmend deutlich. Wird die Wärmeleitfähigkeit dagegen wie in Abbildung 6.18 unabhängig vom Verarbeitungszeitpunkt über die Trockenrohddichte aufgetragen, zeigt sich, dass die vorangegangene Betonentwicklung im Labor auch bei der Herstellung im Realmaßstab zu sehr niedrigen Messwerten der Wärmeleitfähigkeit führt.

Mit dem Wechsel des zweistufigen Mischverfahrens vom Suspensionsmischer auf die Suspensionsmischanlage ist ein weiterer Anstieg der Wärmeleitfähigkeit zu beob-

Tabelle 6.14.: Maßstabseinfluss auf Wärmeleitfähigkeit und Trockenrohddichte

Maßstab	Wärmeleitfähigkeit λ_B [W/(m · K)]				Trockenrohddichte [kg/m ³]			
	Zeit nach Mischbeginn							
	20 min	1 h	2 h	3 h	20 min	1 h	2 h	3 h
91	0,115	0,110	0,120	0,110	425	426	437	441
901	0,125	0,125	0,120	0,140	451	460	465	501
10001	0,140				456			

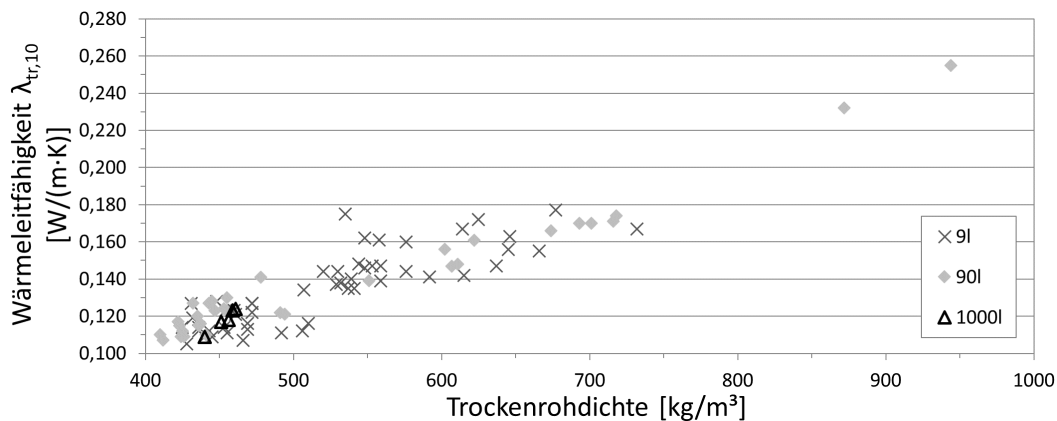


Abbildung 6.18.: Zusammenhang von Wärmeleitfähigkeit und Dichte

achten. Hierfür wurde die Wärmeleitfähigkeit an Probekörpern ermittelt, die nach Mischende hergestellt wurden. Der Bemessungswert liegt bei $0,140 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und damit $21,7\%$ über dem bei der Herstellung von kleinen Mengen im Labor erzielten Wert von $\lambda_B = 0,115 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Die den in Tabelle 6.14 zusammengefassten Bemessungswerten zugrundeliegenden Messwerte sind neben weiteren Messwerten in Abbildung 6.18 dargestellt.

Bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit mittels THB-Verfahren wird neben der Wärmeleitfähigkeit die spezifische Wärmekapazität bestimmt. Mit Messwerten zwischen $600 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ und $840 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ liegt die spezifische Wärmekapazität etwas unterhalb der in [4] für Infralichtbeton angegebenen von $c_p = 870 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Auch für Normalbeton sind Werte in der Größenordnung von $850 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [4] bis $1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Tabelle 6.15.: Wärmeleitfähigkeit des porierten Zementsteins in Abhängigkeit der Verarbeitungsdauer

Wärmeleitfähigkeit [W/(m · K)]		Zeit nach Mischbeginn			
		20 min	1 h	2 h	3 h
Messwert	$\lambda_{tr,10}$	0,170	0,170	0,171	0,174
Nennwert	λ_D	0,175	0,175	0,180	0,185
Bemessungswert	λ_B	0,185	0,185	0,190	0,195

[74, 83, 69] dokumentiert. Diese Streuung einzelner Werte ist auf die Vielfalt möglicher Betonzusammensetzungen zurückzuführen.

Die thermischen Kenngrößen Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte und spezifische Wärmekapazität sowie die aus diesen berechnete Diffusivität und Effusivität des Warmbetons sind in Tabelle 6.16 Literaturwerten für einen weiteren Warmbeton und Porenbeton gegenübergestellt. Im Vergleich mit den in [4] angegebenen Werten führt insbesondere die deutlich geringere Trockenrohichte des entwickelten Warmbetons zu einer niedrigeren Effusivität und höheren Diffusivität. Beide Werte sind trotz der geringeren spezifischen Wärmekapazität mit denen von Porenbeton vergleichbar. Die mit $207 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ geringe Effusivität des Warmbetons beschreibt eine sehr langsame Wärmeaufnahme aus der Umgebung. Die Effusivität von Normalbeton, der sich im Vergleich mit metallischen Werkstoffen ebenfalls durch eine langsame Wärmeaufnahme auszeichnet, liegt bei rund $2000 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$ [4]. Die mit $\alpha = 0,36 \text{ mm}^2/\text{s}$ niedrige Diffusivität des Warmbetons beschreibt eine langsame Temperaturänderung im Bauteil, die sich im Falle einer Temperaturänderung in der Umgebung des Bauteils einstellt.

Die am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP mittels Zweiplattenverfahren bestimmte Wärmeleitfähigkeit beträgt $\lambda_{tr,10} = 0,111 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Der am IWB im Heizbrückenverfahren an denselben Probekörpern aus 6 Einzelmessungen bestimmte Wert von $\lambda_{tr,10} = 0,107 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ liegt in der gleichen Größenordnung wie der zuvor im Referenzverfahren ermittelte. Folglich beschreiben die am IWB ermittelten und in Tabelle 6.14 und Tabelle 6.13 zusammengefassten Messwerte die Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons ausreichend genau.

Während die Materialinhomogenität bei zweiseitigen Messungen zwischen zwei Probekörpern zu einem deutlichen Unterschied zwischen Messungen an aufgeschnittenen Probekörpern und Messungen an der Schalseite führt, zeigen die in Abbildung 6.19 dargestellten Messreihen, dass dieser Einfluss bei der einseitigen Messung vernachlässigbar ist. Der in Abschnitt 4.2.6 in erster Näherung vorgeschlagene Korrekturfaktor $k_w = 1,972$ führt jedoch zu überhöhten Werten der Wärmeleitfähigkeit. Entsprechend wurde mit den durchgeführten Messungen ein auf den Warmbeton abgestimmter Korrekturfaktor bestimmt. Für die bessere Vergleichbarkeit mit Messungen an Gebäu-

Tabelle 6.16.: Thermische Kenngrößen von Warmbeton und Porenbeton im Vergleich

	Warmbeton	Infralichtbeton [4]	Porenbeton [83]
Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]	0,11	0,14	0,10...0,31
Rohdichte [kg/m^3]	480	800	300...1000
Spez. Wärmekapazität [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]	715	870	1000
Diffusivität [mm^2/s]	0,36	0,20	0,4
Effusivität [$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$]	207	312	250

den wurden weitere, in Abbildung 6.20 zusammengefasste, Messreihen bei weiteren Feuchtegehalten des Betons durchgeführt. Die mittels zweiseitiger Messung ermittelten und in Tabelle 6.17 aufgeführten Messwerte der Wärmeleitfähigkeit zeigen mit rund $0,002 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bzw. 2% einen deutlich geringeren Anstieg der Wärmeleitfähigkeit je M. – % aufgenommener Feuchte des Warmbetons als in [73, 74] angegeben.

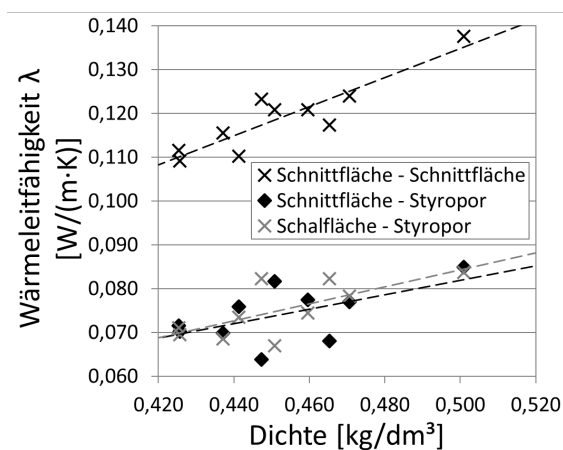


Abbildung 6.19.: Einfluss der Messmethode auf die mittels THB-Verfahren ermittelten Messwerte der Wärmeleitfähigkeit

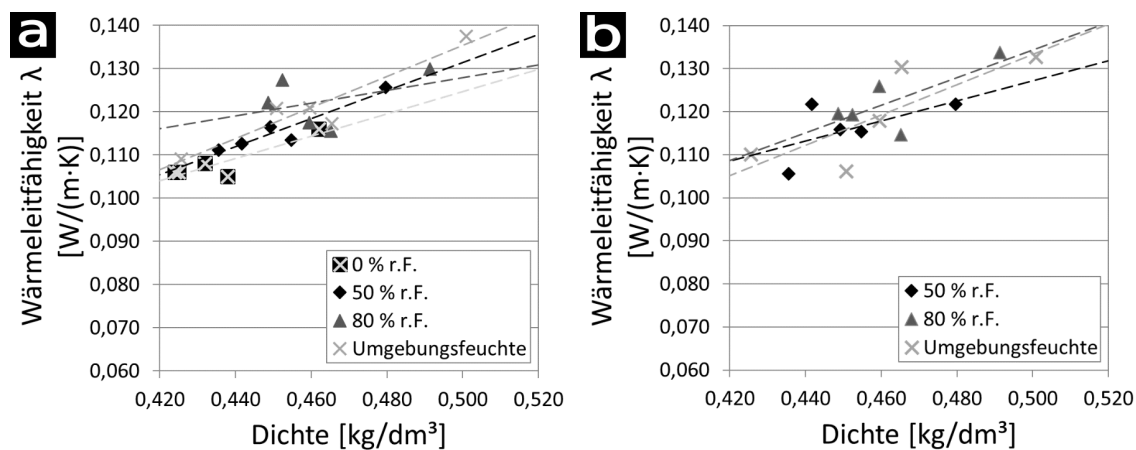


Abbildung 6.20.: Einfluss der Materialfeuchte auf die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit, a) zweiseitige Messung, b) einseitige Messung an der Schallfläche

Die so ermittelten Korrekturfaktoren für die einseitige Messung der Wärmeleitfähigkeit sind in Tabelle 6.17 zusammengefasst. Dennoch traten bei der vergleichenden Messung an Probekörpern und Wandelementen Abweichungen auf (vgl. Tabelle 6.18). Des weiteren fällt hierbei auf, dass die Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons bei der Herstellung in der Suspensionsmischanlage von $\lambda_{tr,10} = 0,106 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ im Labormaßstab auf $\lambda_{tr,10} = 0,118 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ im Realmaßstab steigt.

Tabelle 6.17.: Korrekturfaktor für die einseitige Messung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Feuchtegehalts

		0 % r.F.	50 % r.F.	80 % r.F.	Umgebungs- feuchte
Rohdichte ρ [kg/m ³]		436	452	463	460
Wärmeleit- fähigkeit λ [W/(m · K)]	zweiseitig	0,108	0,116	0,122	0,121
	einseitig _{Messwert}	0,079	0,077	0,088	0,075
	einseitig _{korrigiert}	0,107	0,116	0,123	0,119
Standardab- weichung σ [–]	zweiseitig	0,004	0,005	0,006	0,009
	einseitig	0,004	0,004	0,005	0,007
Korrekturfaktor k_w		1,354	1,516	1,518	1,585

Tabelle 6.18.: Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons bei der Herstellung im Realmaßstab

		Wandelement Mischung 1	Wandelement Mischung 2	10er-Würfel Mischung 2
Wärmeleitfähigkeit				
$\lambda_{tr,10}$	[W/(m · K)]			0,118
$\lambda_{einseitig}$	[W/(m · K)]	0,101	0,106	
$\lambda_{einseitig,korrigiert}$	[W/(m · K)]	0,159	0,168	
Trockenrohichte	[kg/m ³]	445	456	456

Diese Wärmeleitfähigkeit ist in Tabelle 6.18 Vergleichsmessungen an Wandelementen gegenübergestellt. Mit Mischung 1 ist ein Zwischenschritt während der Anpassung an die Suspensionsmischanlage bezeichnet, die mit einem geringfügig höheren Gehalt an Blähglas einen höheren Verdichtungsaufwand erfordert. Die Zusammensetzung des Betons, Mischung 2, ist in Tabelle 6.2 gegeben. Die mit dem Korrekturfaktor für Messungen bei Umgebungsfeuchte $k_w = 1,585$ ermittelte Wärmeleitfähigkeit von 0,168 W/(m · K) weicht um 0,05 W/(m · K) deutlich von dem unter Normbedingungen gemessenen Wert von $\lambda_{tr,10} = 0,118$ W/(m · K) ab. Da die Wandelemente im Gegensatz zu den Probekörpern nach der Herstellung nicht getrocknet wurden und zudem Beregnung ausgesetzt waren, ist mit einem höheren Feuchtegehalt des Porenraums zu rechnen.

Die mit dem Feuchtegehalt steigende Standardabweichung der Messwerte spiegelt die Materialinhomogenität wider (vgl. Tabelle 6.17). Die Feuchteaufnahme wird von der Matrix dominiert und erhöht deren Wärmeleitfähigkeit. Entsprechend nimmt mit steigendem Feuchtegehalt neben der Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Betons auch die Standardabweichung der Messwerte sowie der zu verwendende Korrekturfaktor zu. Die Messungen bei Umgebungsfeuchte fügen sich nicht in die übrigen Messreihen ein. Die Umgebungsfeuchte wurde während der Messungen zwar nicht dokumentiert,

die höhere Standardabweichung dieser Messreihe legt jedoch schwankende relative Luftfeuchten nahe. Eine Aufzeichnung der Umgebungsfeuchte sowie der Masse und damit der Dichte der Probekörper zum Prüfzeitpunkt in gleicher Form wie bei den drei Messreihen mit definierter Luftfeuchte wäre eine Voraussetzung für das Einordnen der Messungen.

6.4. Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit des Warmbetons wird maßgeblich von seiner hochporösen Struktur beeinflusst. Diese begünstigt sowohl durch die wechselnde Umgebungsfeuchte bedingte hygrische Formänderungen, als auch die Wasseraufnahme, die sich zudem im Fall von monolithischen Außenwänden direkt auf die Wärmeleitfähigkeit auswirkt. Der Carbonatisierungsfortschritt wird ebenfalls deutlich beschleunigt, während die Frostbeständigkeit aufgrund der enthaltenen Luftporen positiv beeinflusst wird.

6.4.1. Carbonatisierungsverhalten

Die mit 6 Vol. – % CO₂ beaufschlagten Prismen waren nach 28 Tagen bereits durchcarbonatisiert. Die porosierte Matrix führt auch an der Luft zu einem schnellen Fortschreiten bis hin zur vollständigen Carbonatisierung nach 140 Tagen, siehe Abbildung 6.21. Der Farbumschlag der Phenolphthaleinlösung zeigte nach 28 Tagen bereits eine Carbonisierungstiefe von 8 mm. Der pH-Wert des Blähglases liegt mit 7 [183] unterhalb der Farbumschlagsgrenze von Phenolphthaleinlösung bei einem pH-Wert zwischen 8 und 10. Entsprechend unregelmäßig wirkt der Carbonatisierungsfortschritt, da der Farbumschlag überwiegend im Bereich der Matrix erfolgt. Auch wenn der Probekörper nach 56 Tagen einen teilweise carbonatisierten Kern aufweist, deuten die Prüfungen nach 28, 84 und 112 Tagen mit einer vom Rand aus zunehmenden Carbonisierungstiefe auf ein überwiegend gleichmäßiges Eindringen von CO₂ hin.

Um eine Beeinträchtigung der Dauerhaftigkeit durch den schnellen Carbonatisierungsfortschritt zu vermeiden, sind monolithische Warmbetonwände mit einer Bewehrung aus Edelstahl, Glasfasern oder mit verzinktem Bewehrungsstahl auszubilden. Die verzinkte Bewehrung stellt hiervon die kostengünstigste Variante dar.

6.4.2. Beständigkeit gegenüber Abwitterung

Die Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen wurde sowohl anhand von Frost-Tau-Wechseln als auch anhand des Einflusses wechselnder Luftfeuchten auf den E-Modul

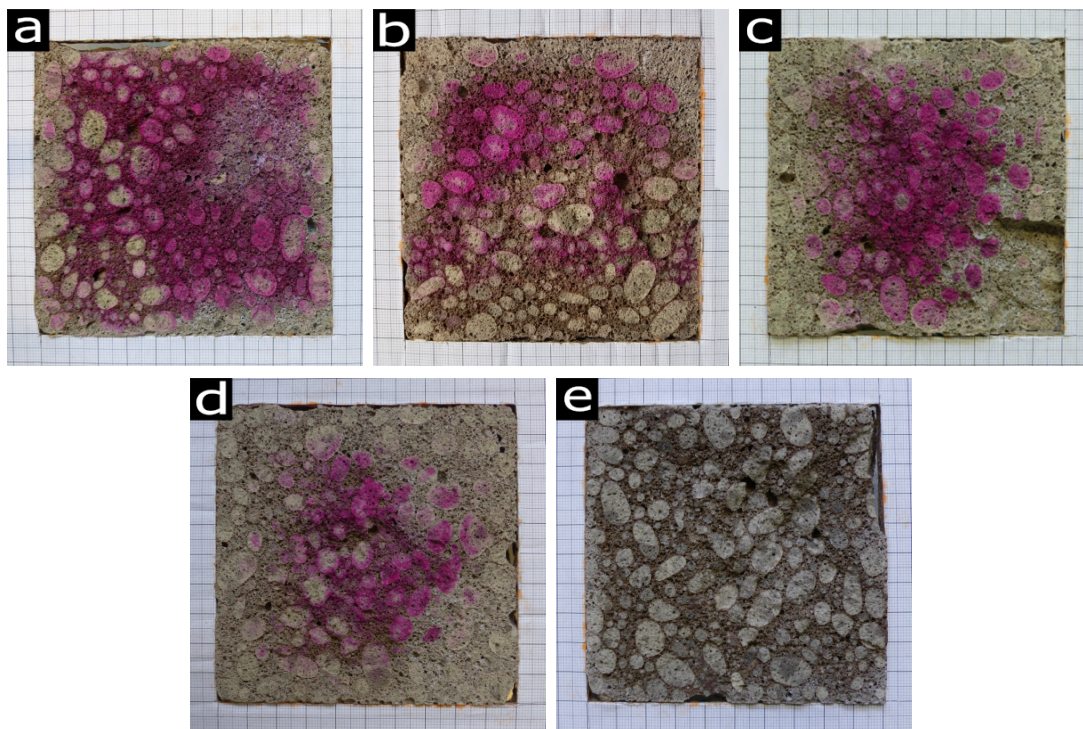


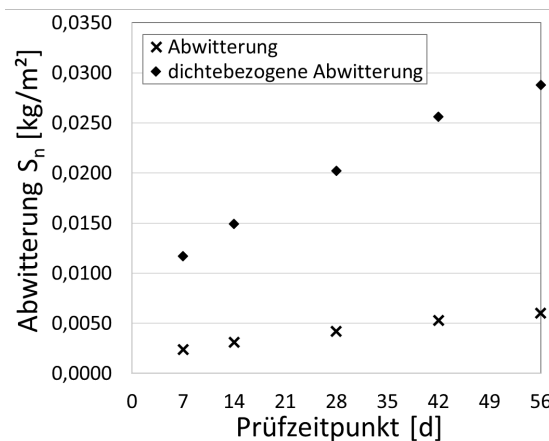
Abbildung 6.21.: Carbonatisierungstiefe nach a) 28, b) 56, c) 84, d) 112 und e) 140 Tagen

untersucht. Eine Übersicht der zur Ermittlung des Frost-Tau-Widerstands bestimmten abgewitterten Masse je Quadratmeter S_n zu den jeweiligen Prüfzeitpunkten ist in Tabelle 6.19 und in Abbildung 6.22 gegeben. Aufgrund der geringen Dichte von 480 kg/m^3 des Warmbetons ist die Masse des abgewitterten Materials ebenfalls sehr gering. Wird für Normalbeton eine Dichte von 2300 kg/m^3 angesetzt, beträgt der dichtebezogene Korrekturfaktor k_p zur Ermittlung der dichtebezogenen Abwitterung 4,8. Die nach 56 Frost-Tau-Wechseln nicht sichtbar geschädigte Prüfoberfläche zeigt die Beständigkeit gegenüber Abwitterung in Abbildung 6.23.

Weitere Probekörper wurden in einem Klimaschrank mit wechselnder Luftfeuchte von 80 % und 10 % beaufschlagt. Die hygrischen Formänderungen, die mit Schwindrinnen aufgezeichnet wurden, führten bei den im Klimaschrank gelagerten Probekörpern innerhalb von 12 Monaten ebenfalls zu keiner sichtbaren Abwitterung. An Zylindern wurde zusätzlich der E-Modul gemessen, um eine innere Gefügestörung auszuschließen. Um den Einfluss der Feuchtwechslagerung wiederzugeben, ist diese Messreihe nicht bezogen auf die Rohdichte, sondern auf den Prüfzeitpunkt bezogen dargestellt. In Abbildung 6.24 ist die Entwicklung des E-Moduls getrennt für bei einer Temperatur von 10°C und 20°C hergestellte Probekörper dargestellt. Die Mittelwerte beider Messreihen streuen um einen Wert von 2600 N/mm^2 . Da diese Probekörper vor der Anpassung der Verdichtung (vgl. Abschnitt 5.3) hergestellt wurden, liegt der E-Modul unter dem in

Tabelle 6.19.: Abwitterung S_n infolge Frost-Tau-Beanspruchung

	S_n [kg/m^2]	$S_{n,dichtebezogen}$ [kg/m^2]
7 d	0,0024	0,0117
14 d	0,0031	0,0149
28 d	0,0042	0,0202
42 d	0,0053	0,0256
56 d	0,0060	0,0288

Abbildung 6.22.: Abwitterung S_n infolge Frost-Tau-Beanspruchung

Abschnitt 6.3.1 abschließend ermittelten E-Modul von 2730 N/mm^2 .

Dennoch lässt sich ablesen, dass sich wechselnde Umgebungsfeuchten bei gleichen Prüfbedingungen nicht nennenswert auf den E-Modul auswirken. Das wird auch in Abbildung 6.28 deutlich. Hier zeigt das Angleichen der Probekörper an die Umgebungsfeuchte zwar einen Einfluss auf die Betondichte zum Prüfzeitpunkt, jedoch nicht auf den E-Modul.

Die in Abbildung 6.25 dargestellten einzelnen, zu Beginn und Ende des Beobachtungszeitraums ermittelten, Messwerte zeigen zum ersten Prüfzeitpunkt nach 28 Tagen

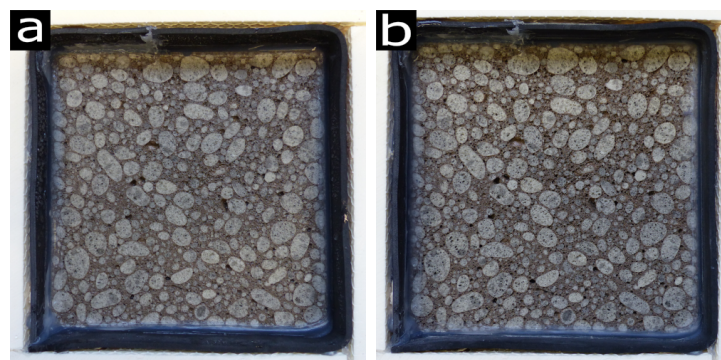


Abbildung 6.23.: Oberfläche a) bei Prüfbeginn und b) nach 56 Frost-Tau-Wechseln ohne sichtbare Abwitterung

die breiteste Streuung der Steifigkeit. In Abbildung 6.26 und Abbildung 6.27 ist neben dem E-Modul auch die Betondichte zum Prüfzeitpunkt aufgetragen. Der Wassereintrag beim Schleifen der Prüfflächen führt beim ersten Prüfzeitpunkt zu erhöhten Massen der Probekörper, die sich auf die ermittelten E-Moduln auswirken. Im Verlauf des Beobachtungszeitraums von einem Jahr gleicht sich der Feuchtegehalt und damit die Dichte der Zylinder aneinander an. Ein Trocknen der Probekörper vor der ersten Messung war nicht möglich, da das wirksame Betonalter für die Lagerung bei 10 °C mithilfe einer Reifefunktion bestimmt wurde. Da im Weiteren Verlauf der Einfluss der Feuchtwechslagerung auf die Dauerhaftigkeit betrachtet wurde, sind die Messwerte ebenfalls in Bezug auf die zeitliche Entwicklung und nicht auf die Rohdichte dargestellt.

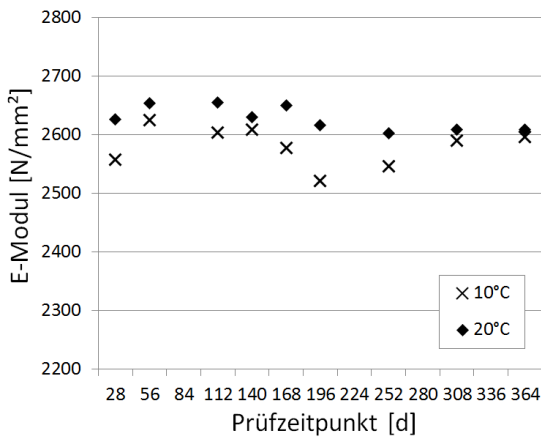


Abbildung 6.24.: Entwicklung des E-Moduls unter zyklischer Feuchtebeaufschlagung

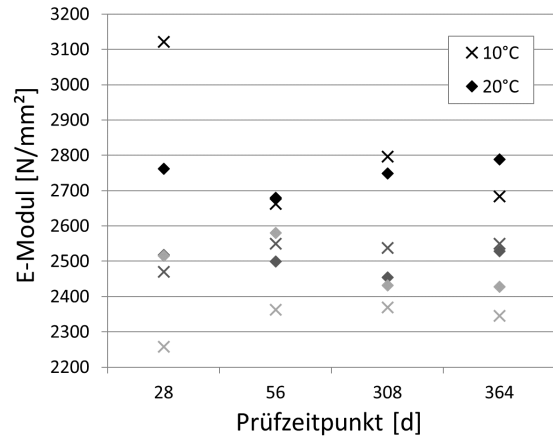


Abbildung 6.25.: Streuung der Messwerte bei der Ermittlung des E-Moduls

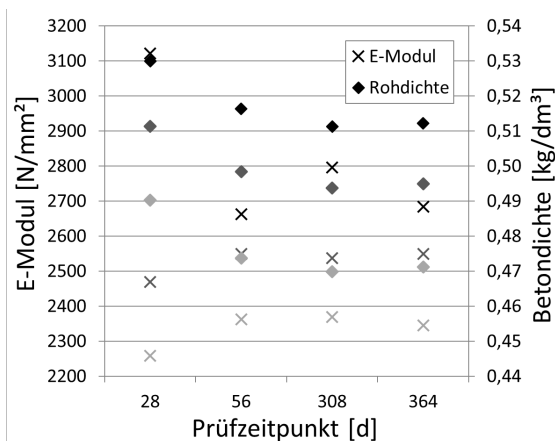


Abbildung 6.26.: E-Modul und Dichte der bei 10 °C hergestellten Probekörper

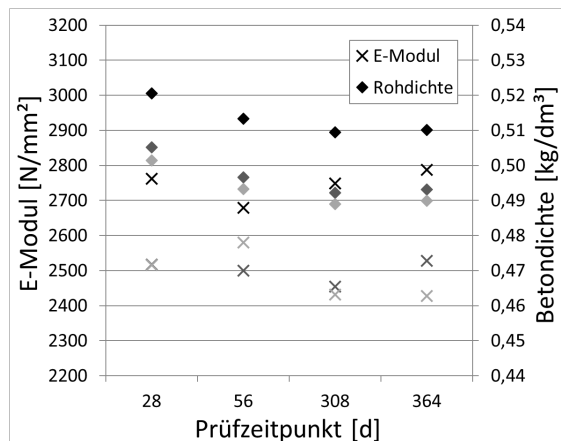


Abbildung 6.27.: E-Modul und Dichte der bei 20 °C hergestellten Probekörper

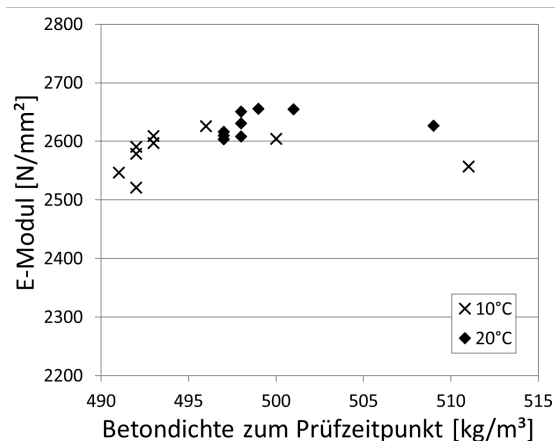


Abbildung 6.28.: E-Modul und Dichte des Warmbetons zum Prüfzeitpunkt

6.4.3. Wasseraufnahme

Die zu Beginn der Betonentwicklung hergestellten Betone mit einer Trockenrohddichte von ca. 1000 kg/m^3 weisen ein dichtes Gefüge und mit $W_w < 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ für einen Bezugszeitraum von 24 Stunden eine niedrige Wasseraufnahme auf. In Abbildung 6.29 sind die während der Betonentwicklung ermittelten Wasseraufnahmekoeffizienten über die Rohddichte der Betone aufgetragen. Die Zugabe eines Verzögerers zur Verlängerung der Verarbeitbarkeitsdauer, die bei hohen Zement- und Kalksteinmehlgehalten 1 Stunde zunächst unterschritt, führte zu einer Gefügeveränderung, die mit einer deutlichen Zunahme der Wasseraufnahme bis zu einem Wasseraufnahmekoeffizienten von $W_w = 0,3154 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ einhergeht. Dem kann mit der gleichzeitigen Zugabe eines Dichtungsmittels begegnet werden. Der Austausch von Kalksteinmehl und Glasmehl durch die bei Liaver anfallenden Zusatzstoffe, gebranntes Tonmehl und Schleifstaub, wirkte sich nicht auf die Wasseraufnahme des Betons aus. Eine Reduktion der Zusatzstoffe und insbesondere des Zementgehalts zur Verringerung der Wärmeleitfähigkeit führte jedoch wie die Verwendung von Verzögerer zu einem Ansteigen der Wasseraufnahme von unter $0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ auf ca. $0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$. Mit dem Ziel, die Wärmeleitfähigkeit weiter zu reduzieren, wurde das Schleifstaubvolumen erhöht, woraufhin der Wasseraufnahmekoeffizient nach 2 Stunden bereits $2,2447 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ betrug und der Versuch infolge einer Sättigung des Probekörpers abgebrochen wurde. Ein Beton mit $W_w > 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ ist als saugend einzustufen und nicht zur Ausbildung monolithischer Wände geeignet. Die ohne Schleifstaub hergestellten Betone sind dagegen mit einem Wasseraufnahmekoeffizienten $\leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ als wasserabweisend einzustufen.

Mit der Erhöhung des Blähglasgehalts war eine weitere Reduzierung der Wasseraufnahme des Warmbetons möglich. Tabelle 6.20 zeigt Einflussgrößen auf den Wasseraufnahmekoeffizienten W_w der gewählten Zusammensetzung, der über einen Bezugszeitraum von

24 Stunden ermittelt wurde. Angegeben ist jeweils der Mittelwert aus drei Messungen, die für die Probekörper aus Beton in Abbildung 6.30 einzeln dargestellt sind. Das Porengefüge im Beton wird durch das Blähglas unterbrochen, so dass die Wasseraufnahme lediglich 13 % bis 25 % der Wasseraufnahme des Zementsteins beträgt. Zudem zeigt die Auswertung der Porengrößenverteilung mit dem Digitalmikroskop ein zunehmendes Verbinden von mehreren feinen Luftporen zu größeren Poren nicht nur in Abhängigkeit des Verarbeitungszeitpunkts sondern auch durch die Zugabe der Gesteinskörnung. Von diesen Poren wird das kapillare Aufsaugen von Wasser ebenfalls unterbrochen.

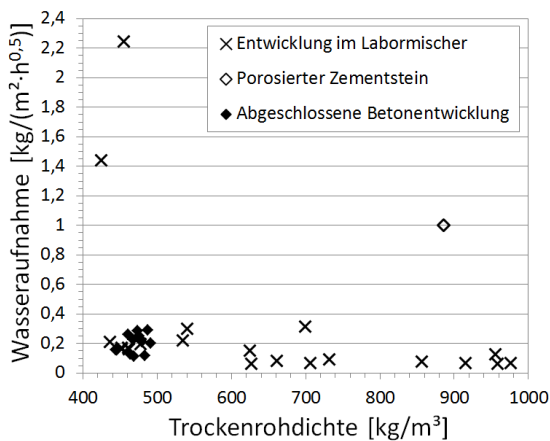


Abbildung 6.29.: Mit steigender Porosität zunächst steigender Wasseraufnahmekoeffizient während der Betonentwicklung

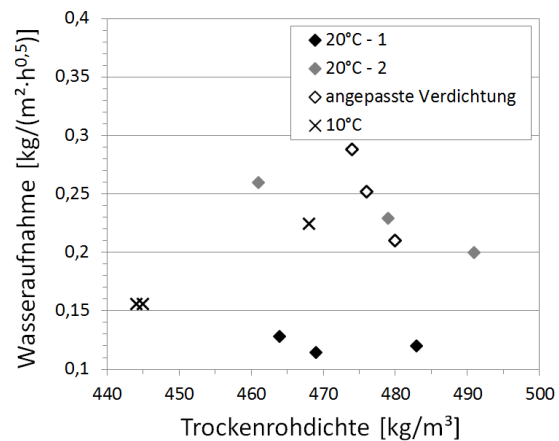


Abbildung 6.30.: Betrachtung möglicher Einflussfaktoren auf den Wasseraufnahmekoeffizienten des Warmbetons

Tabelle 6.20.: Wasseraufnahmekoeffizient W_w nach 24 Stunden

W_w [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$]		20 °C			10 °C
		Zementstein	Beton		
			Protein	Tensid	
Verdichtung (Frequenz)	unverdichtet	1,003	-	-	-
	niedrig	-	0,290	0,127...0,229	0,179
	hoch	-	-	0,250	-

Die Verwendung eines Schaumbildners auf Proteinbasis führt innerhalb von 24 Stunden trotz der für Proteinschäume beschriebenen geschlossenzelligen Porenstruktur zu einer höheren Wasseraufnahme. Der Beton unterscheidet sich im Wesentlichen durch den Luftporen- bzw. Schaumbildner. Der Proteinschaum wurde für den optimalen Aufschluss des Schaumbildners mithilfe eines Schaumgenerators hergestellt und anschließend mit dem Fließmittel und dem Bindemittel vermischt. Das Verfahren ist für die Herstellung von Mineralschäumen erprobt, allerdings werden dabei deutlich niedrigere Feststoffge-

halte eingesetzt. Das Zusammenfallen des Proteinschaums konnte durch eine reduzierte Fließmitteldosierung zwar reduziert, jedoch nicht gänzlich verhindert werden. Die höhere Wasseraufnahme des Betons zeigt, dass sich die Porenstruktur durch den hohen Feststoffgehalt ändert.

Da der Luftporenbildner auf Tensidbasis im Zusammenspiel mit den weiteren Ausgangsstoffen zu einem stabileren Porengefüge führt, wurde die Wasseraufnahme in zwei Messreihen an Probekörpern aus verschiedenen Chargen untersucht. Auch wenn die Probekörper der ersten Versuchsreihe mit einem Wasseraufnahmekoeffizienten von $0,1195 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$, $0,1278 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ und $0,1338 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ lediglich eine geringe Streuung um den Mittelwert von $0,127 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ aufweisen, zeigt die zweite Messreihe mit $W_W = 0,229 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$, dass Herstellung und Verarbeitung sowie die Inhomogenität von Beton die Materialeigenschaften einzelner Probekörper beeinflussen. Ein Temperaturunterschied von 10°C bei Herstellung und Lagerung der Probekörper führt zu einer Wasseraufnahme, die mit $W_W = 0,179 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ innerhalb des bei 20°C gemessenen Bereichs liegt. Eine für den Warmbeton angepasste Verdichtung der Probekörper führt ebenfalls zu einer geringfügig höheren Wasseraufnahme, da so das gewünschte gleichmäßig verdichtete Gefüge ermöglicht wird. Die Wasseraufnahme dieser Probekörper streut zwar stärker als die der weiteren Messreihen, die Rohdichte der einzelnen Probekörper liegt jedoch deutlich näher am Mittelwert (vgl. Abbildung 6.30). Das zeigt, dass die Verdichtung bei erhöhter Frequenz ein fehlerstellenfreies Ausfüllen der Schalung ermöglicht und damit die Materialinhomogenität reduziert.

7. Bewertung der Betoneigenschaften

Die in Kapitel 6 zusammengefassten Eigenschaften des entwickelten Warmbetons werden im Vergleich mit den in Kapitel 3 vorgestellten Infraleichtbetonen mit Bezug auf die Übertragbarkeit in den Realmaßstab bewertet. Im Hinblick auf das Zusammenspiel von Dichte, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit werden ein ebenfalls am IWB entwickelter Holzleichtbeton und Porenbeton der Druckfestigkeitsklasse 4 in die Bewertung einbezogen.

7.1. Vergleich mit Infraleichtbetonen

Die erzielte Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit wird in ihrem Zusammenspiel mit der erreichten Druckfestigkeit der Betone betrachtet. Für die Übertragung vom Labor in die Praxis sind weitere Eigenschaften wie Schwinden, Kriechen, Verbund mit der Bewehrung und die Dauerhaftigkeit von Bauteilen von Bedeutung. Entsprechend werden für diesen Vergleich im Wesentlichen Betone herangezogen, deren Entwicklung bereits über den Labormaßstab hinausgeht. Zusätzlich wird das Materialverhalten mithilfe der in DIN EN 1520 [12] gegebenen Zusammenhänge zwischen der Druckfestigkeit und weiteren Festbetonkennwerten für haufwerksporigen Leichtbeton abgeschätzt.

7.1.1. Frischbetoneigenschaften

Der Frischbeton ist unmittelbar nach der Herstellung weich und verdichtungswillig, was sich in dem niedrigen Verdichtungsmaß von 1,01 zeigt (vgl. Tabelle 6.3). Mit zunehmender Verarbeitungsdauer steift der Beton an und erfordert 3 Stunden nach Mischbeginn bereits einen deutlich höheren und auf die geringe Betondichte abgestimmten Verdichtungsaufwand. Im Vergleich dazu sind die Infraleichtbetone nach [14, 32] fließfähiger. Mit einem Setzfließmaß von 680 mm bis 700 mm [32] bzw. mit dem Einhalten der Konsistenzklasse C4 innerhalb einer Stunde nach Mischbeginn sind die Betone selbstverdichtend. Der betrachtete Verarbeitungszeitraum ist mit 90 Minuten ab Mischbeginn jedoch deutlich kürzer und der Frischbeton nach 90 Minuten über das Verdichtungsmaß als weich zu klassifizieren [14]. Eine Verarbeitung des in dieser

Arbeit entwickelten Warmbetons innerhalb des betrachteten Zeitraums von 3 Stunden ist dennoch bei guter Oberflächenqualität und ohne Festigkeitseinbußen möglich.

Das Entweichen von Luftporen mit zunehmender Verarbeitungs- und Erstarrungsdauer wirkt sich auf die Festbetoneigenschaften aus. Bei kurzen Transportwegen, die eine kurze Verarbeitungsdauer ermöglichen, kann dem mit einer erhöhten Beschleunigerdosierung entgegengewirkt werden.

7.1.2. Erstarrungsverhalten

Die stark verzögerte Hydratation des Warmbetons ist auf die Zusatzmittel, insbesondere den Luftporenbildner, zurückzuführen. Durch das gewählte Mischregime und den damit erzielten guten Aufschluss des Bindemittels wird ein Entlüften der eingebrachten Luftporen reduziert und damit die Wirksamkeit des LP-Bildners verbessert. In der Folge steigt auch der Einfluss der Zusatzmittel auf den zeitlichen Verlauf der Hydratation und wirkt einer durch die hohe Deagglomeration der feinen Bindemittelpartikel beschleunigten Reaktion entgegen. Neben den Zusatzmitteln trägt der geringe Klinkergehalt der Zusammensetzung zur Verzögerung der Hydratation des Warmbetons bei. Die Abmischung des Zementklinkers mit Hüttensand, calciniertem Ton und Silikastaub verlangsamt die Erhärtung zusätzlich.

Während in [14] die Zugabe von Scherbeneis erforderlich war, um das Maximum der Hydratationswärme von 88 °C auf 68 °C zu reduzieren, ist die bei der Hydratation des Warmbetons auftretende geringe Wärmeentwicklung unkritisch. Die geringe Hydratationswärme verzögert die Erhärtung jedoch zusätzlich.

Die unter Baustellenbedingungen von den im Labor herrschenden 20 °C abweichende Umgebungstemperatur beeinflusst das Erstarrungsverhalten und damit die Festigkeitsentwicklung von Beton. Um die Übertragbarkeit in den Realmaßstab sicherzustellen, wurde dieser Einfluss untersucht und bereits in Abschnitt 6.2.1 zusammengefasst. Wie bei Normalbeton verkürzen hohe Temperaturen im Sommer die Verarbeitungsdauer, wohingegen niedrige Temperaturen eine längere Mindeststandzeit der Schalung erfordern. Die für den Warmbeton in Abhängigkeit der Temperatur ermittelte Erstarrungsdauer ist in Tabelle 7.1 zusammengefasst.

Ein Vergleich der Druckfestigkeit der bei 10 °C hergestellten und erhärteten Probekörper und der Wärmeflussmessung legt nahe, dass die Reifefunktion das wirksame

Tabelle 7.1.: Erstarrungsdauer des Warmbetons in Abhängigkeit der Temperatur

Umgebungstemperatur [°C]	5	10	20	30
Erstarrungsende [h]	119,2	89,5	75,4	38,7
Mindeststandzeit der Schalung [d]	5	4	4	2

Alter von Warmbeton bei niedrigen Temperaturen deutlich unterschätzt. Die Reife-funktion ermöglicht lediglich ein Abschätzen der erforderlichen Ausschallfrist sowie der anschließenden Festigkeitsentwicklung, wohingegen die Ermittlung des Erstarrungsendes mithilfe der Wärmeflussmessung in Abhängigkeit der Temperatur eindeutig möglich ist.

Weder die Frischbetonstabilität noch die Druckfestigkeit des Warmbetons werden von niedrigen Temperaturen beeinträchtigt. Das langsamere Erstarren des Frischbetons ermöglicht jedoch ein längeres Entweichen von Luftporen (vgl. Abschnitt 6.3.5). Dieser Effekt ist bereits bei einer Temperatur von 10 °C sichtbar. Da die Hydratationswärme bei einer Temperatur von 5 °C zudem nur langsam entsteht, ist vom Betonieren vor Ort bei Frost ohne eine Anpassung der Beschleunigerdosierung oder zusätzliche schützende Maßnahmen abzusehen. Die Mindeststandzeit der Schalung liegt bei einer niedrigen Temperatur von 5 °C bereits bei 5 Tagen (vgl. Tabelle 7.1), wohingegen in [5] auch im Winter eine nur wenig längere Standzeit von 7 Tagen beschrieben wird. Bei höheren Temperaturen zwischen 10 °C und 20 °C ist ein Ausschalen nach 4 Tagen möglich.

7.1.3. Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und E-Modul

Die Abschätzung des E-Moduls nach DIN EN 1520 [12] (vgl. Abschnitt 3.2.1) ist in Abbildung 7.1 über die im Versuch an drei Messreihen mit jeweils drei Probekörpern ermittelten Messwerte aufgetragen. Die Messwerte des Warmbetons liegen trotz der sehr geringen Rohdichte am oberen Rand des in [139] ermittelten Bereichs. Die Rohdichte der zum Vergleich herangezogenen haufwerksporigen Leichtbetone liegt zwischen 500 kg/m³ und 600 kg/m³.

Der in Abbildung 7.2 über die Festigkeit aufgetragene Quotient aus berechnetem und gemessenem E-Modul liegt ebenfalls innerhalb des in [139] ermittelten Bereichs. Bezogen auf die Trockenrohddichte (Abbildung 7.3) wird der E-Modul des Warmbetons jedoch deutlich weniger konservativ abgeschätzt.

Im Gegensatz zu den in [139] ermittelten Messwerten wurde der E-Modul des Warmbetons an gesondert hergestellten Zylindern mit dem in DIN EN 12390-13 [156] für Normalbeton vorgesehenen Prüfablauf gemessen. Der E-Modul von haufwerksporigem Leichtbeton ist dagegen nach DIN EN 1352 [184] an aus Bauteilen entnommenen Prismen zu bestimmen. Nach DIN EN 1520 [12] liegt die Festigkeit bei der Herstellung von Probekörpern in Schalungen mindestens um den Faktor 1/0,85 über der Festigkeit von aus dem Bauteil entnommenen Probekörpern. Wird davon ausgegangen, dass der an gesondert hergestellten Probekörpern gemessene E-Modul ebenfalls über dem an aus dem Bauteil entnommenen ermittelten liegt, ist die Abschätzung nach DIN EN 1520 [12] für den entwickelten Warmbeton nur geringfügig konservativ.

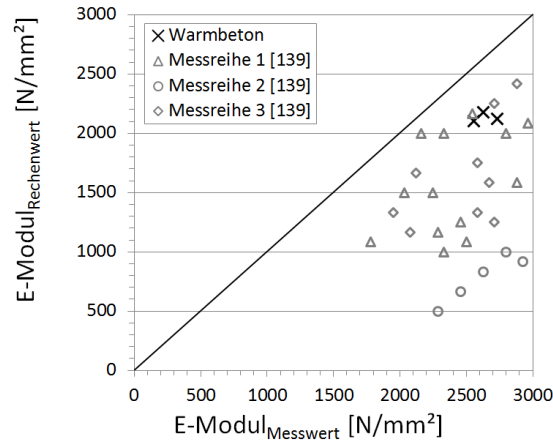


Abbildung 7.1.: Rechnerisch nach DIN EN 1520 [12] und im Versuch ermittelte E-Moduln im Vergleich mit den Werten aus [139]

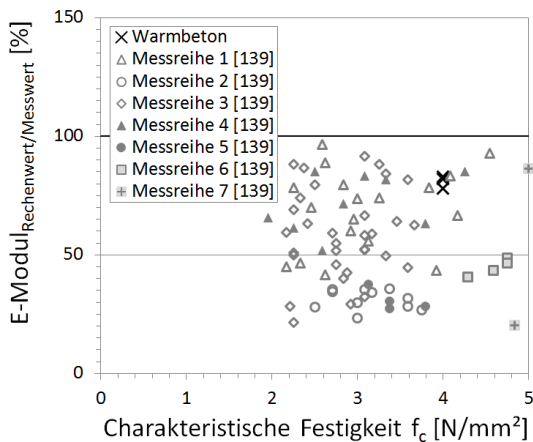


Abbildung 7.2.: Quotient der rechnerisch und im Versuch ermittelten E-Moduln in Abhängigkeit der Festigkeit im Vergleich mit den Werten aus [139]

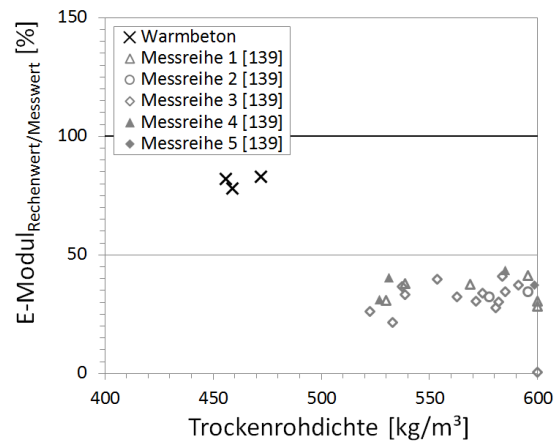


Abbildung 7.3.: Quotient der rechnerisch und im Versuch ermittelten E-Moduln in Abhängigkeit der Rohdichte im Vergleich mit den Werten aus [139]

Bei der Abschätzung des E-Moduls nach DIN EN 1520 [12] resultiert aus einer höheren Festigkeit bei gleichbleibender Dichte ein höherer E-Modul. Ebenso aus einer höheren Rohdichte bei gleichbleibender Festigkeit, da der dichtebezogene Korrekturfaktor η_2 den Rechenwert weniger stark reduziert. Abbildung 7.4 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit, Rohdichte und E-Modul nach DIN EN 1520 [12]. Im Vergleich zu den über 20 Jahre alten Betonen in [139] weist der entwickelte Warmbeton ein deutlich besseres Verhältnis von Festigkeit zu Rohdichte auf, wie es nach [90] für haufwerksporige Leichtbetone mit porosierter Matrix üblich ist. Infolge der bei sehr niedriger Trockenrohdichte erzielten vergleichsweise hohen Festigkeit wird der E-Modul nach DIN EN 1520 [12] höher und damit nur leicht konser-

vativ abgeschätzt. Die in [138, 139, 140] beobachtete konservative Abschätzung des E-Moduls haufwerksporiger Leichtbetone ist dennoch für den entwickelten Warmbeton gültig.

Wird der E-Modul dagegen für gefügedichten Leichtbeton nach Eurocode 2 [141] abgeschätzt, werden die Messwerte des Warmbetons deutlich unterschätzt. Die Mess- und Rechenwerte des E-Moduls sind in Tabelle 7.2 aufgeführt. Während der nach DIN EN 1520 [12] bestimmte Rechenwert zwischen 78 % und 83 % des im Versuch ermittelten E-Moduls beträgt (vgl. Abbildung 7.2 und Abbildung 7.3), liegt die Abschätzung nach EC 2 [141] bei nur 37 % bis 41 % der Messwerte.

Betone mit sehr geringer Rohdichte wie der entwickelte Warmbeton sind folglich mit den in DIN EN 1520 [12] festgelegten Zusammenhängen zwischen Rohdichte, Druckfestigkeit und E-Modul genauer einzuschätzen als mit denen für gefügedichten Leichtbeton.

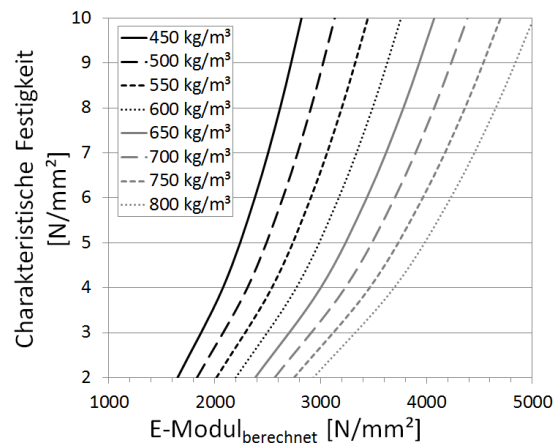


Abbildung 7.4.: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit, Rohdichte und E-Modul nach DIN EN 1520 [12]

Tabelle 7.2.: Für den Warmbeton ermittelte Mess- und Rechenwerte des E-Moduls

	Trockenrohddichte [kg/m ³] DIN EN 12390-7 [185]	E-Modul [N/mm ²]		
		Messwert DIN EN 12390-13 [156]	Rechenwert DIN EN 1520 [12]	Rechenwert EC 2 [141]
Messreihe 1	472	2626	2180	1070
Messreihe 2	456	2558	2106	998
Messreihe 2	459	2730	2120	1012

7.1.4. Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit

Die Zusammenfassung von Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit verschiedener Warmbetone in Tabelle 7.3 zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit mit der durchgeführten Ent-

wicklung deutlich reduziert werden konnte. Wie bei der Betonentwicklung für den Bau des Experimentalgebäudes in Kaiserslautern [32] wurde bei der Übertragung vom Labor- auf einen Produktionsmischer die gleiche Druckfestigkeit erreicht. Auch der herstellbedingte Anstieg der Wärmeleitfähigkeit um $0,01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ deckt sich mit den Erfahrungen aus Kaiserslautern. Die Druckfestigkeit von $5,1 \text{ N}/\text{mm}^2$ erlaubt bei reduzierter Wärmeleitfähigkeit die selben Anwendungen für den Warmbeton. Abbildung 7.5 zeigt die Wärmeleitfähigkeit der in Tabelle 7.3 aufgeführten Betone bezogen auf die Rohdichte. Die auf die Festigkeit normierte Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons zeigt mit $0,023 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})/(\text{N}/\text{mm}^2)$ ebenfalls eine Verbesserung im Vergleich der in [32, 5] vorgestellten Betone (vgl. Tabelle 7.3). Infolge der mit $14,2 \text{ N}/\text{mm}^2$ deutlich höheren Druckfestigkeit des Betons in [14] ist die normierte Wärmeleitfähigkeit mit $0,013 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})/(\text{N}/\text{mm}^2)$ stark reduziert. Der Zementstein des Warmbetons weist mit $0,010 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})/(\text{N}/\text{mm}^2)$ ein vergleichbar gutes Verhältnis von hoher Druckfestigkeit und niedriger Wärmeleitfähigkeit auf (vgl. Tabelle 7.4). Dagegen führt eine weitere Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit aufgrund der deutlich geringeren Druckfestigkeit im Fall des Aerogelinfrleichtbetons aus [147] im Vergleich mit dem entwickelten Warmbeton fast zu einer Verdopplung der normierten Wärmeleitfähigkeit auf $0,038 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})/(\text{N}/\text{mm}^2)$.

Der entwickelte Warmbeton weist einen Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_B = 0,125 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ auf, der bei einer Wandstärke von 50 cm zu einem U-Wert von $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ führt. Eine Einhaltung des Referenz-U-Werts von $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ist in Deutschland nicht für jedes einzelne Bauteil der Gebäudehülle vorgeschrieben, sondern durch die gesamte Konstruktion eines Gebäudes zu erreichen [186]. Dementsprechend ist ein U-Wert der Außenwände von $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ in Kombination mit einem geeigneten Dachaufbau oder einer angepassten Anlagentechnik ausreichend.

Tabelle 7.3.: Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit des entwickelten Warmbetons im Vergleich mit weiteren Warmbetonen

	Warmbeton (Infrleichtbeton)					
	Mischung D2		[32]		[5]	[14]
Druckfestigkeit [N/mm^2]	5,1	5,1	6,3	6,3	7,0	14,2
Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]	0,108	0,118	0,15	0,16	0,181	0,185
normierte Wärmeleitfähigkeit [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})/(\text{N}/\text{mm}^2)$]	0,021	0,023	0,024	0,025	0,026	0,013
Entwicklungsstufe [—]	4	7	4	7	9	9

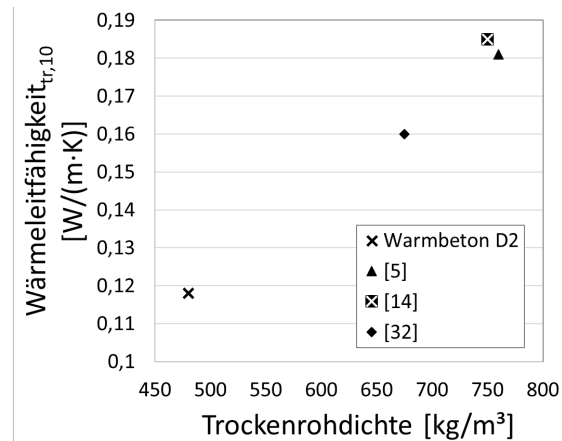


Abbildung 7.5.: Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte des entwickelten Warmbetons (Warmbeton D2) im Vergleich mit weiteren Warmbetonen

Tabelle 7.4.: Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit vom porosierten Zementstein des Warmbetons und des Aerogelinfralichtbetons

	porosierter Zementstein Mischung D2	Aerogelinfralichtbeton [147]
Druckfestigkeit [N/mm ²]	16,3	2,4
Wärmeleitfähigkeit [W/(m · K)]	0,171	0,09
normierte Wärmeleitfähigkeit [W/(m · K)/(N/mm ²)]	0,010	0,038
Entwicklungsstufe [—]	4	4

Einflussgrößen auf die Wärmeleitfähigkeit

Die in Tabelle 6.13 aufgeführte Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons ist über einen Verarbeitungszeitraum des Frischbetons von bis zu 2 h nach Mischbeginn gleichbleibend niedrig. Erst bei einer Verarbeitung des Betons 3 h nach Mischbeginn steigt der Messwert der Wärmeleitfähigkeit an. Dieser Sprung in den Messwerten deckt sich sowohl mit der Beobachtung, dass der Frischbeton bis zu 2 h nach Mischbeginn weich und gut verarbeitbar ist und erst anschließend ansteift, als auch mit der Zunahme der Trockenrohddichte mit der Verarbeitbarkeitsdauer, die in Tabelle 6.14 zusammengefasst ist.

Dagegen ist weder ein Einfluss der durchgeführten Verdichtung noch der Umgebungstemperatur während der Erhärtung auf die Wärmeleitfähigkeit erkennbar. Sowohl das Verdichten mit niedriger Amplitude und hoher Frequenz, mit dem eine ansprechende Oberfläche erzielt wird, als auch das Erhärten bei einer Temperatur von 10 °C bewirken keine Veränderung der Wärmeleitfähigkeit, was ein robustes Verhalten in Bezug auf Verarbeitungseinflüsse auf Baustellen erwarten lässt.

Abweichende Messwerte der Wärmeleitfähigkeit wurden lediglich an Probekörpern ermittelt, die Proteinschaumbildner anstelle des LP-Bildners auf Tensidbasis enthalten. Die geringere Stabilität der Luftporen geht mit erhöhtem Feststoffgehalt des Warmbetons einher, in der Folge steigt die Wärmeleitfähigkeit.

Die in Tabelle 6.15 dargestellten Mess-, Nenn- und Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit des porierten Zementsteins weisen darauf hin, dass der Wasserbedarf für die Oberflächenbenetzung des Blähglases das Ansteifen des Betons beschleunigt. Während die Wärmeleitfähigkeit des Betons über die Verarbeitungsdauer mit sinkender Verdichtungswilligkeit um $0,01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ steigt, fällt die Steigerung für den porierten Zementstein mit $0,004 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ von $\lambda_{10,\text{tr}} = 0,170 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ auf $\lambda_{10,\text{tr}} = 0,174 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ geringer aus. Die Wärmeleitfähigkeit des Zementsteins wird durch den hohen Luftporengehalt deutlich reduziert.

Da Luftporen im Frischbeton nicht vollständig volumenstabil sind, wird die mögliche Verarbeitbarkeitsdauer neben der Konsistenz von dem Zielwert der Wärmeleitfähigkeit beschränkt. Während die Luftporen direkt nach Mischende gleichmäßig im Bindemittelleim verteilt sind, zeigen die Aufnahmen zur Auswertung der Porengrößenverteilung in Abhängigkeit des Verarbeitungszeitpunkts in Abbildung 6.13 ein Zusammenfallen einzelner Poren zu größeren Poren. Damit geht die Gleichmäßigkeit der Porenstruktur verloren, diese Veränderung hat ein Ansteigen der Wärmeleitfähigkeit zur Folge. Auch die einzelnen Messwerte der 3 h nach Mischbeginn hergestellten Probekörper streuen stärker als die der nach Mischende hergestellten Probekörper. Daraus resultiert ein höherer Faktor zur Berechnung des Nennwerts aus den Messwerten.

Ein Verarbeitungszeitraum von 2 h ermöglicht nahezu gleichbleibende Frisch- und damit Festbetoneigenschaften. Dadurch ist das Einhalten der angestrebten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_B \leq 0,147 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ trotz der geringfügig höheren Wärmeleitfähigkeit bei der Herstellung in der Suspensionsmischanlage möglich (vgl. Tabelle 6.14 und Tabelle 6.18).

Der Vergleich von Wärmeleitfähigkeit und Trockenrohddichte in Abhängigkeit von Verarbeitungszeitpunkt und Mischvolumen zeigt dennoch einen Maßstabseinfluss auf. Die geringeren Bemessungswerte bei der Herstellung von nur 9 l Beton im Labormischer sind auf das schnelle und gleichmäßige Befüllen der Schalungen bei kleinen Mengen, sowie das langsamere Ansteifen des Zementleims bei Zugabe der Gesteinskörnung direkt vor der Herstellung der Probekörper zurückzuführen.

Auch wenn der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit im Realmaßstab bereits nach Mischende an der im Rahmen der Betonentwicklung angestrebten Obergrenze liegt, genügt er damit den Anforderungen der EnEV 2016. Grund für die höhere Wärmeleitfähigkeit bei der Herstellung des Bindemittelleims in der Suspensionsmischanlage ist der erhöhte Bindemittelgehalt, der trotz der geringeren Deagglomeration der Feinstoffe

eine ausreichende Viskosität erzeugt und damit ein Entlüften der eingebrachten Mikroluftporen verhindert. Die sowohl bei der Herstellung von 91 und 901 Beton betrachtete Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit über eine Verarbeitungsdauer von 3 h zeigt, dass der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit im Mittel über die Dauer mit $0,115 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und $0,125 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ jeweils den zu Beginn der Verarbeitbarkeitsdauer bestimmten Werten entspricht. Wird mit 60 min Transportweg zur Baustelle gerechnet, ist die Einhaltung der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_B \leq 0,147 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ mit dem entwickelten Warmbeton möglich.

Die Übereinstimmung der mittels Plattenverfahren und mittels Heizbrückenverfahren gemessenen Wärmeleitfähigkeit zeigt, dass die am IWB bestimmten Werte aussagekräftig sind. Damit sind Vergleichsmessungen an Gebäuden möglich. Zur Vorbereitung solcher Messungen durchgeführte Versuchsreihen bei unterschiedlichem Feuchtegehalt des Warmbetons sind in Tabelle 6.17 zusammengefasst. An den Messwerten ist auffallend, dass der Einfluss der Materialinhomogenität bei höherem Feuchtegehalt steigt, da der Zementstein Wasser adsorbiert, wodurch die Wärmeleitfähigkeit steigt. Dieser über die Standardabweichung abgebildete Effekt ist bei der zweiseitigen Messung stärker ausgeprägt und spiegelt sich in Abbildung 6.20 in der Streuung des Ordinatenabschnitts.

In [32] zeigen eingebaute Sensoren, dass der Feuchtegehalt des Betons mit einem Wasseraufnahmekoeffizienten $< 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ nach Niederschlagsereignissen lediglich bis etwa 20 mm Abstand zur Oberfläche ansteigt. Die Wasseraufnahme des in dieser Arbeit entwickelten Warmbetons ist nach dem Anpassen der Verdichtung mit $W_w = 0,25 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ zwar höher, der Beton gilt damit aber ebenfalls als wasserabweisend (vgl. Tabelle 6.20). Folglich ist davon auszugehen, dass die gemessene Wärmeleitfähigkeit über den größten Teil des Wandquerschnitts auch nach Niederschlagsereignissen konstant erhalten bleibt. Zudem ist im Gebäude das Verdunsten zum Innenraum hin möglich. In der Folge ist mit steigendem Betonalter ein Angleichen an den im Labor bestimmten Wert anzunehmen.

Das Ziel dieser Arbeit, einen Warmbeton mit einem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_B \leq 0,147 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ zu entwickeln, wurde mit einer ausreichenden Druckfestigkeit von $5,1 \text{ N}/\text{mm}^2$ erreicht.

Die Eigenschaften des Zementsteins deuten darauf hin, dass mit einer Verringerung des Blähglasgehalts und einer Reduzierung des Größtkorns ein verbessertes Verhältnis von Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit möglich ist. Dieses geht allerdings mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_B \geq 0,147 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ einher, die bei monolithischem Wandaufbau von den weiteren Bauteilen der Gebäudehülle zu kompensieren ist. Auch die damit einhergehende erhöhte Wasseraufnahme ist zu berücksichtigen, beispielsweise mit dem Aufbringen eines zusätzlichen Hydrophobierungsmittels auf die Betonoberfläche.

7.1.5. Verbund

In Tabelle 7.5 und Tabelle 7.6 sind die ermittelten Werte für Verbundspannung und Schlupf Vergleichswerten aus [5, 150] gegenübergestellt. Während sich die Verwendung von Bewehrungsstahl mit einem kleinen Durchmesser von 8 mm positiv auf die Verbundspannung auswirkt, wie die Messungen in [150] bestätigen, bildet die horizontal in den Würfeln einbetonierte Bewehrung Baustellenbedingungen realistisch ab. Trotz niedrigerer Druckfestigkeit von $5,1 \text{ N/mm}^2$ im Vergleich zu $6,2 \text{ N/mm}^2$ in [150] bzw. $7,0 \text{ N/mm}^2$ in [5] liegt die Verbundfestigkeit von $1,86 \text{ N/mm}^2$ bzw. von $3,31 \text{ N/mm}^2$ zu Bewehrungsstahl über den in [5, 150] ermittelten Werten. Dies ist vermutlich auf den niedrigeren Wasser-Bindemittel-Wert des Warmbetons zurückzuführen, der den Verbund positiv beeinflusst. Insbesondere der Vergleich mit dem Infraleichtbeton aus [5] zeigt dabei jedoch, dass die Betonoptimierung hin zu einer sehr geringen Trockenrohddichte von 480 kg/m^3 die Sprödhheit des Betons erhöht. Das wird in dem geringen Schlupf des Warmbetons von $0,2 \text{ mm}$ (Glasfaserbewehrung) bzw. von nur $0,05 \text{ mm}$ (Bewehrungsstahl) deutlich. Der Schlupf des Infraleichtbetons mit einer Trockenrohddichte von 760 kg/m^3 ist rund dreimal so groß. Die höhere Verbundspannung zum Stahl ist nach [5] auf die Geometrie der Stabrippen zurückzuführen.

Tabelle 7.5.: Verbundspannung von Warmbeton und Glasfaserbewehrung

	Stabdurchmesser [mm]	Verbund [N/mm ²]	Schlupf [mm]
Warmbeton D2	8	1,86	0,2
Infraleichtbeton [5]	12	0,87	0,703
Infraleichtbeton ILC 600 [150]	8	1,6	0,3
	12	2,3	0,4

Tabelle 7.6.: Verbundspannung von Warmbeton und Bewehrungsstahl

	Stabdurchmesser [mm]	Verbund [N/mm ²]	Schlupf [mm]
Warmbeton D2	8	3,31	0,05
Infraleichtbeton [5]	12	1,04	0,169
Infraleichtbeton ILC 600 [150]	8	1,8	0,2
	12	1,7	0,7

7.1.6. Schwindverhalten

Das nach einem Jahr bestimmte Endschwindmaß des Warmbetons ist mit $0,2 \text{ mm/m}$ deutlich niedriger als das der Infraleichtbetone in [5, 14] mit $0,9 \text{ mm/m}$. Auch die infolge des anfänglichen Quellens rund doppelt so hohe Gesamtverzerrung von $0,44 \text{ mm/m}$

ist vergleichsweise gering. Dazu trägt neben dem durch die packungsdichtebasierte Mischungsentwicklung erzielten stabilen Korngerüst der niedrige Zementgehalt bei.

Die irreversible Schwindverzerrung ist nach [49] auf das erste Trocknen des Betons zurückzuführen. Hierbei bilden sich Kontaktstellen zwischen Partikeln, die sich nicht wieder lösen. Der reversible Anteil von Schwinden und Quellen infolge von Befeuchtung und Austrocknung ist sowohl auf eine Änderung der freien Oberflächenenergie als auch auf den bei hohen Feuchtegehalten aufgrund von Kapillarkondensation in den Gelporen entstehenden Spaltdruck zurückzuführen [49, 52]. Die Feuchtwechslagerung des Warmbetons während der Schwindmessung macht diesen reversiblen Anteil von Schwinden und Quellen sichtbar. Aufgrund der hohen Porosität des Warmbetons bei entsprechend geringer Festigkeit ist von einem vergleichsweise hohen reversiblen Anteil auszugehen.

Neben der relativen Luftfeuchte sind Umgebungstemperatur und Probekörpergröße als Einflussfaktoren sowohl auf das Schwind- als auch auf das Kriechverhalten bekannt [50].

Die in Abbildung 6.6 dargestellten Schwindmessungen zeigen ein Quellen des jungen Warmbetons, das bei den zum Schutz vor Austrocknung abgedeckten Schwindrinnen (Bild a) stärker ausgeprägt ist. Neben der beginnenden Carbonatisierung ist der geringere Feuchtegehalt eine mögliche Ursache für das mit $130\ \mu\text{m}/\text{m}$ deutlich geringere Quellen im Vergleich zu $246\ \mu\text{m}/\text{m}$ des vor Austrocknung geschützten Betons.

Die niedrigere Umgebungsfeuchte während der Schwindmessung unter erhöhter CO_2 -Beaufschlagung reduziert und verlangsamt das Quellen des Betons. Während am Beton in den abgedeckten Schwindrinnen bei Sättigungsfeuchte nach 5,5 Tagen die maximale Länge aufgezeichnet wird und die Verzerrung anschließend in Schwinden umschlägt, beginnt das Schwinden der bei 80 % r.F. gelagerten Proben erst nach 25 Tagen. Wird der Warmbeton nach 4 Tagen ausgeschalt, wie es bei einer Umgebungstemperatur von 20°C möglich ist, ist mit einem anfänglichen Quellen des Betons von bis zu $246\ \mu\text{m}/\text{m}$ zu rechnen. Diese Längenänderungen des Betons können im Bauteil zu Eigenspannungen führen, die rissbildend wirken. Dem ist konstruktiv, z. B. über die erforderliche Mindestbewehrung, entgegenzuwirken [187].

Auch die gleichmäßige Längenzunahme und -abnahme infolge der wechselnden Beaufschlagung der Schwindrinnen mit hoher und niedriger Luftfeuchte von 80 % bzw. 10 % verdeutlicht, dass das anfängliche Quellen von der während des Mischvorgangs eingestellten Wassersättigung ausgelöst wird.

Das anfängliche Quellen des Warmbetons wurde durch eine Wärmebehandlung der Probekörper direkt nach der Herstellung um das hundertfache auf 2 % bis 3 % erhöht. Das Quellen trat sowohl an matrixporigen Probekörpern, die Luftporenbildner enthalten,

als auch an Probekörpern mit unporosiertem Zementstein in der gleichen Größenordnung auf. Die hohe Porosität des Warmbetons, die bei wechselnder Feuchtebeaufschlagung den reversiblen Anteil von Schwinden und Quellen verstärkt, ist folglich nicht die Ursache für diese hohe Längenzunahme der Probekörper. Auch die für die Wärmebehandlung von 40 °C gewählte Temperatur liegt unter dem Temperaturmaximum von 57 °C, das in der Mitte eines größeren Elements mit einem Durchmesser von 47 cm infolge der Hydratationswärmeentwicklung gemessen wurde. Weder die Temperatur von 40 °C noch die Verwendung eines Hochofenzements mit einem Hüttensandgehalt von 48 % sprechen für eine treibende DEF, die ein Quellen über einen Zeitraum von bis zu einem Jahr zur Folge hat [53, 92, 55]. Auch eine Wärmebehandlung bereits ausgeschalteter Probekörper führte weder zu einem Quellen noch zu einem Festigkeitsverlust, so dass bei Ortbeton ohne Wärmebehandlung nicht mit der aufgetretenen treibenden Reaktion zu rechnen ist.

Die Porosität des Warmbetons erhöht den Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Längenänderung der Probekörper. Dies geht aus den in Abbildung 6.8 dargestellten Längenänderungen von Leim- und Mörtelprismen unterschiedlicher Zusammensetzung hervor. Trotz annähernd konstanter Massenzunahme bei hoher Umgebungsfeuchte ist das Quellen der Probekörper mit dichtem Gefüge vernachlässigbar, wogegen das Porengefüge der porösen Probekörper mit großer innerer Oberfläche von der schwankenden Luftfeuchte stärker beeinflusst wird. Die aus Zementleim und Blähglas bestehenden haufwerksporigen Prismen weisen mit ca. 0,37 mm/m im Vergleich mit den weiteren Zusammensetzungen eine hohe Längenänderung auf. Auch wenn das Korngerüst den Beton stabilisiert und selber keine Umgebungsfeuchte aufnimmt, sind haufwerksporige Betone trotz des hohen Anteils an Gesteinskörnung aufgrund der sehr hohen Porosität anfällig für hygri-sche Formänderungen.

Die geringen Dimensionen der Prismen verstärken mit der großen freien Oberfläche die Längenänderungen zusätzlich, da die Umgebungsfeuchte schneller aufgenommen und abgegeben werden kann. Die volumenbezogene spezifische Oberfläche S_V beträgt 112,5 m²/m³, wohingegen der Beton in den Schwindrinnen nur über die Oberseite Kontakt zur Umgebungsluft hat. Mit $S_V = 16,67$ m²/m³ fallen die in der Schwindrinne aufgezeichneten, in Abbildung 6.6 Bild a, dargestellten Längenänderungen von ca. 55 µm/m deutlich geringer aus als die der Prismen gleicher Zusammensetzung mit 620 µm/m. Die geringere volumenbezogene spezifische Oberfläche von 50 cm dicken Wänden, die beispielsweise bei einer 4,1 m breiten und 2,93 m hohen und von einem Fenster mit den Abmessungen von 1,5 m auf 1,5 m durchbrochenen Wand 4,79 m²/m³ beträgt, lässt an Gebäuden niedrigere hygri-sche Formänderungen erwarten.

Zudem ist die im Versuch gewählte Beaufschlagung mit regelmäßig um 70 % steigender bzw. sinkender relativer Luftfeuchte extremer als unter realen Umgebungsbedingungen.

Abbildung 7.6 zeigt den Jahresverlauf der relativen Luftfeuchte in Stuttgart 2016. Die aufgezeichneten Werte der relativen Luftfeuchte liegen zwischen 43 % r.F. im Mai und 99 % r.F. im Januar und schwanken damit im Jahresverlauf um maximal 56 %. Die höchste Änderung innerhalb weniger Tage lag im Mai mit einem Anstieg von 43 % r.F. auf 91 % r.F. bei 48 %.

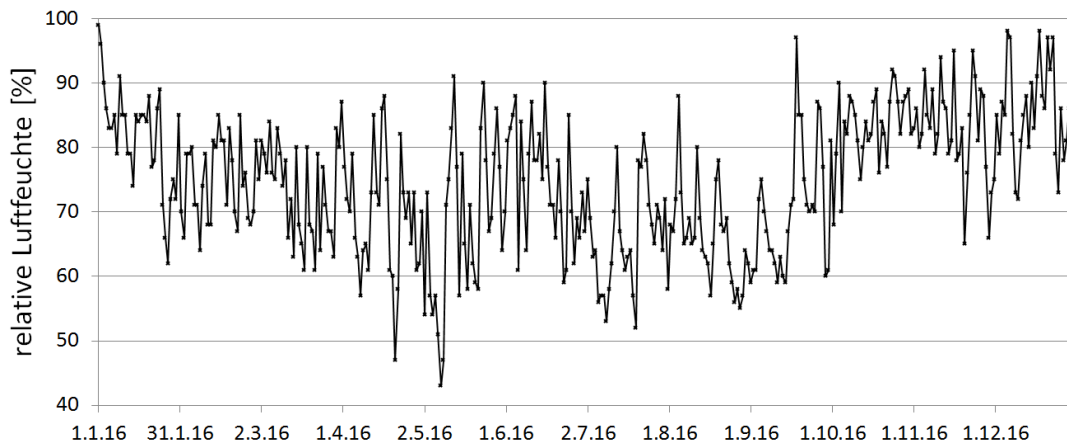


Abbildung 7.6.: Jahresverlauf der relativen Luftfeuchte in Stuttgart 2016 mit Daten der Wetterstation Schnarrenberg [188]

7.1.7. Kriechverhalten

Vergleichbar mit dem geringen Schwindmaß liegt auch die im Kriechversuch nach einem Jahr gemessene Gesamtverzerrung bei nur 0,962 mm/m. Die Belastung betrug hierbei ein Drittel der Betonfestigkeit, was im Kriechversuch von [14] zu einer Gesamtverzerrung von 1,94 mm/m nach 456 Tagen geführt hat, wobei die Messkurve ab einem Jahr Belastungsdauer deutlich abflacht. Das spezifische Kriechmaß von 0,18 (mm/m) / (N/mm²) [14] liegt dagegen nur knapp über dem hier ermittelten von 0,154 (mm/m) / (N/mm²). Die Kriechverzerrung beider Betone liegt deutlich unter den in [5] bestimmten Werten.

Spannungsspitzen im Gefüge, die unter Belastung auftreten, können aufgrund der ungleichen Steifigkeit von Matrix und Gesteinskörnung des Warmbetons durch Lastumlagerungen abgebaut werden. Die in der Folge höheren Kriechverzerrungen sind bei Warmbeton E erwartungsgemäß aufgetreten. Dennoch weist Warmbeton D2 ein geringeres Kriechmaß als der zum Vergleich betrachtete Porenbeton auf. Warmbeton D2 zeichnet sich im Vergleich mit Warmbeton E durch einen um 9,3 Vol. – % höheren Blähglasgehalt von 69,4 Vol. – % aus (vgl. Tabelle 6.2). Der hohe Gehalt an Blähglas reduziert Formänderungen des Festbetons [16, 45] und die Möglichkeit der Lastumlagerung.

7.1.8. Porengrößenverteilung

Bei der niedrigen Temperatur von 10 °C bildet sich ein erhöhter Anteil an kleinen Poren mit Durchmessern zwischen 20 nm und 30 nm aus. Damit geht jedoch, wie auch in [60] beobachtet, ein insgesamt erhöhtes Porenvolumen einher. Der Anteil an Poren im gesamten Mesoporenbereich bis 50 nm ist mit 11,85 % und 10,58 % (10 °C, vgl. Abbildung 6.11 a und b) bzw. 9,91 % und 11,31 % (20 °C, vgl. Abbildung 6.11 c und d) jedoch vergleichbar. Das jeweils bei einer Probenvorbereitung bei 105 °C gemessene größere Porenvolumen deutet darauf hin, dass bei dieser hohen Temperatur Strukturänderungen im Gefüge auftreten, die zu einem erhöhten Porenvolumen führen. Das mit 48,66 % deutlich geringere Porenvolumen der bei 20 °C hergestellten und bei 70 °C getrockneten Probe ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die feinen Blähglaspartikel nicht vollständig entfernt werden konnten. Mit steigendem Anteil an Blähglas mit einer unbeschädigten und damit undurchlässigen Partikeloberfläche sinkt das mit der Messung erreichbare Porenvolumen. Aber auch der Anstieg der Messkurve am oberen Rand des mittels Quecksilberdruckporosimetrie messbaren Porengrößenbereichs deutet darauf hin, dass diese Messprobe einen hohen Anteil an Poren aufweist, die mit der Messung nicht erfasst werden können.

Während sowohl die optisch ausgewerteten Luftporen (vgl. Abbildung 6.15, Bild III) als auch der Modalwert bei niedrigeren Temperaturen die Bildung von kleineren Poren anzeigen, lässt der Medianwert der mittels Quecksilberdruckporosimetrie erfassten Porendurchmesser keine eindeutige Aussage zu (vgl. Tabelle 6.11). Der Mittelwert der Porendurchmesser deutet dagegen auf die Bildung feiner Poren bei der höheren Temperatur von 20 °C hin. Der höhere Anteil an sehr feinen Poren der bei 10 °C hergestellten Proben zeigt zwar eine Verdichtung der CSH-Phasen an, der mittels Luftporenbildner eingestellte sehr hohe Luftporengehalt des Warmbetons beeinflusst das Gefüge jedoch stärker als die Umgebungstemperatur.

7.1.9. Sorptionsverhalten

Die stark ansteigende Massenzunahme der in Abbildung 6.17 gezeigten Adsorptionsisotherme bei relativen Luftfeuchten über 50 % ist auf die infolge von zunehmender Adsorption von Wassermolekülen eintretende Kapillarkondensation in den Mesoporen zurückzuführen. Kapillarkondensation führt zur Entstehung einer Hystereseschleife. Das ungleichmäßige Porengefüge von Beton mit einer Aneinanderreihung kleiner und großer Poren verzögert die Desorption. Dieser Effekt wird von den über den Luftporenbildner eingebrachten runden Mikroluftporen verstärkt, die die feinen Kapillarporen unterbrechen. In der Folge bildet sich eine weite Hystereseschleife. Die zunehmende Massenabnahme bei sehr niedrigen relativen Luftfeuchten unter 10 % ist darauf zurückzu-

führen, dass erst bei niedrigen Umgebungsfeuchten ein Entweichen der Wassermoleküle aus geschlossenen Makroporen durch feine Öffnungen möglich ist. Das Verbleiben von 2 M. – % Feuchte im Material bei Versuchsende deutet womöglich auf den hohen Luftporengehalt hin. Dieser verzögert die Desorption deutlich, so dass bis zum Erreichen von Massenkonstanz ein längerer Zeitraum erforderlich wäre.

Neben dem hohen Luftporengehalt des Warmbetons trägt nach [65] möglicherweise der Hüttensandgehalt des Zements von 48 % zur Ausbildung der weiten Hystereseschleife der Ad- und Desorptionsisothermen bei.

Die in den Schwindrinnen aufgezeichnete gleichmäßige Längenzunahme und -abnahme des Betons bei steigenden und sinkenden Umgebungsfeuchten deutet darauf hin, dass die Hystereseschleife sich bei wiederholtem Prüfablauf schließt (vgl. Abbildung 6.6). Da eine Trocknung bis zur Massenkonstanz ausschließlich im Labor erreicht werden kann, verbleibt unter realen Umgebungsbedingungen eine Restfeuchte im Beton. Unter der Annahme einer geschlossenen Hystereseschleife liegt die im Rahmen der Sorptionsmessung ermittelte Massenzunahme der Zementsteinproben bei zunehmender relativer Luftfeuchte bis 80 % bei ca. 4 %. Bei gleicher Feuchtebeaufschlagung über einen Zeitraum von 112 h nehmen die aus dem Bindemittelleim hergestellten Prismen 2,2 M. – % Feuchte auf. Selbst bei kleinen Probekörpern stellt sich die Ausgleichsfeuchte erst nach längerer Lagerung bei konstanter Luftfeuchte ein. Folglich ist an Gebäuden lediglich mit einem geringen Einfluss der Umgebungsfeuchte auf die Wärmeleitfähigkeit und Formstabilität zu rechnen.

Poröses Material mit einer hohen inneren Oberfläche trägt über die damit einhergehende Feuchtesorption zu einem guten Raumklima bei. Über die Feuchteaufnahme und -abgabe der Wände werden witterungs- und tageszeitbedingte Schwankungen der Luftfeuchte reguliert. In gemäßigttem und semi-aridem Klima lässt sich der Energieverbrauch für Gebäudeklimatisierung nach [189] mit der Verwendung von Material mit einer hohen Sorptionsfähigkeit wie Leichtbeton um bis zu 30 % senken.

7.1.10. Dauerhaftigkeit

Der von der hohen Porosität begünstigte schnelle Carbonatisierungsfortschritt ist unbedenklich, sofern die Bewehrung nicht vor Korrosion zu schützen ist. Da bei Sichtbetonwänden die Oberflächenqualität entscheidend für die Dauerhaftigkeit ist, wurde die Abwitterung infolge Frost-Tau-Beanspruchung bestimmt. Wie bei der Verwendung von Luftporenbildnern zu erwarten ist, weist der Beton einen hohen Widerstand gegenüber Abwitterung infolge Frost-Tau-Wechseln auf. Für das Plattenprüfverfahren ist bei reiner Frostbeanspruchung kein Grenzwert zur Einordnung des Frost-Tau-Widerstands festgelegt. Dennoch ist auch nach Berücksichtigung des dichtebezogenen Korrekturfaktors deutlich, dass sich je Prüfzyklus nur sehr geringe Mengen Material von der Oberfläche

trennen. Im Plattenverfahren wurde am Warmbeton nach 28 Frost-Tau-Wechseln eine geringe Abwitterung von $S_{n,dichtebezogen} = 20,2 \text{ g/m}^2$ ermittelt (vgl. Abschnitt 6.4.2).

An Infraleichtbeton wurde in [5] im CIF-Test eine Abwitterung von 340 g/m^2 nach 28 Frost-Tau-Wechseln festgestellt. Eine Abwitterung in dieser Größenordnung wird als unbedenklich eingestuft. Bei Leichtbetonen mit porosierter Matrix gilt, dass der hohe LP-Gehalt Abplatzungen bei Frost-Tau-Beanspruchung verhindert. Im CIF-Test wird ebenfalls entmineralisiertes Wasser als Prüflösung verwendet. Allerdings wird der Probekörper in Wasser gelegt, so dass kapillares Saugen die maßgebende Feuchteaufnahme ist, während die Prüflösung im Plattenverfahren auf der Oberfläche des Probekörpers steht. Ein weiterer Unterschied ist, dass die Abwitterung im CIF-Test an der Schalfläche des Probekörpers bestimmt wird. Daraus resultiert möglicherweise eine höhere Abwitterung, da die Prüffläche im Plattenverfahren der Betonzusammensetzung entsprechend zu einem hohen Anteil aus Blähglas besteht (vgl. Abbildung 6.23). Im Vergleich dazu ist die Abwitterung von Mörtelpartikeln bei einer Prüfung der Schalfläche an der gesamten Prüffläche möglich.

Die geringe Masse des abgewitterten Materials zeigt, dass am Warmbeton durch Bewitterung auch bei Frost nicht mit Schäden durch Abplatzungen zu rechnen ist.

Auch wechselnde Luftfeuchte, die mit hygrischen Formänderungen einhergeht, führt zu keiner Schädigung, wie die Entwicklung des E-Moduls über einen Beobachtungszeitraum von einem Jahr zeigt. Schwankende Feuchtegehalte im Beton, die aus der Vorbereitung der Zylinder resultieren, führen zu einer weiten Streuung der ersten in Abbildung 6.26 und Abbildung 6.27 dargestellten Messwerte. Mit zunehmendem Alter der Probekörper bei gleichen Lagerungsbedingungen verringert sich die Streuung der Messwerte. Des Weiteren wird deutlich, dass Rohdichte und E-Modul des Warmbetons nicht von der Temperatur bei der Herstellung und Erhärtung beeinflusst werden und im Labor unter einheitlichen Prüfbedingungen vergleichend ermittelt werden können.

Der für die Ausbildung von monolithischen Wänden geforderte Wasseraufnahmekoeffizient von $W_w < 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ wird mithilfe des enthaltenen Hydrophobierungsmittels eingehalten. Eine niedrige Temperatur von 10°C während der Erhärtung wirkt sich nicht nennenswert auf die Wasseraufnahme des Warmbetons aus. Bei dem Betonieren vor Ort unvermeidbare Temperaturschwankungen sind folglich hinsichtlich der Verarbeitung und der Erstarrungsdauer zu berücksichtigen, wirken sich aber nicht auf die Dauerhaftigkeit des Betons aus. Gleiches gilt für die mit einer verbesserten Verdichtung des Betons einhergehende leichte Erhöhung der Wasseraufnahme auf $W_w = 0,25 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$.

7.1.11. Übertragbarkeit in den Realmaßstab

Über das Betrachten der angestrebten Verarbeitungsdauer von 3 Stunden war das Anpassen des stabilisierenden und beschleunigenden Zusatzes bereits im Labormaß-

stab möglich. Das schnellere Ansteifen des Betons im Vergleich zur aufgeschäumten Suspension bei der Herstellung von 90l Beton anstelle von 9l Beton in der ersten Entwicklungsstufe führte jedoch zunächst zu einer verringerten Druckfestigkeit (vgl. Tabelle 6.5). Diesen Festigkeitseinbußen konnte mit einer auf den Warmbeton abgestimmten Betonverdichtung entgegengewirkt werden (vgl. Abschnitt 5.3). In der Folge blieb die Übertragung vom Laborsuspensionsmischer auf die Suspensionsmischanlage ohne Einfluss auf die Druckfestigkeit des Warmbetons (vgl. Abschnitt 6.3.1). Die angepasste Betonverdichtung ermöglicht trotz instabiler Luftporenstruktur im Frischbeton eine Verarbeitung innerhalb des betrachteten Zeitraums von 3 Stunden bei guter Oberflächenqualität. Während Trockenrohichte und Wärmeleitfähigkeit direkt mit dem Luftporengehalt zusammenhängen, sind die mechanischen Eigenschaften auch über einen längeren Verarbeitungszeitraum betrachtet gleichbleibend.

Auch für die Herstellung bei niedrigen Temperaturen konnte an den bei 10 °C hergestellten und gelagerten Probekörpern negative Auswirkungen auf die Druckfestigkeit ausgeschlossen werden. Umgebungseinflüsse wie die Temperatur sind bei der Anwendung als Ortbeton dennoch zu beachten. Da die Hydratationswärme insbesondere bei niedrigen Temperaturen sehr langsam entsteht (vgl. Abschnitt 6.2.1), ist bei Frost auf das Betonieren ohne eine Anpassung der Beschleunigerdosierung oder zusätzliche schützende Maßnahmen abzusehen.

Die im Vergleich mit den bereits in Bauprojekten eingesetzten Infraleichtbetonen aus [5, 14] geringeren Schwind- und Kriechverzerrungen lassen ebenfalls eine problemlose Anwendung des entwickelten Betons in Gebäuden erwarten.

Mit dem entwickelten Warmbeton ist die Ausbildung von 50 cm dicken monolithischen Außenwänden unter Einhaltung der Vorgaben aus der EnEV 2016 möglich. Die Wärmeleitfähigkeit des Blähglases ist für die Fraktionen $> 2\text{ mm}$ mit $\lambda_B = 0,07\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ angegeben [129]. Der bei der Herstellung in der Suspensionsmischanlage mit 50 Vol. – % hohe Gehalt an grobem Blähglas des Warmbetons reduziert die Wärmeleitfähigkeit der Mischung. Bei Betrachtung der Anteile von Zementstein und Blähglas aus der Stoffraumrechnung (vgl. Tabelle 6.2) liegt der Erwartungswert für die Wärmeleitfähigkeit des Betons rechnerisch bei $0,104\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und damit in der gleichen Größenordnung des Messwertes von $0,108\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Die geringe Abweichung vom rechnerischen Wert spricht für die gelungene Übertragung vom Labor- auf den Suspensions- und Einwellenmischer.

Aufgrund des für die Stabilität der aufgeschäumten Suspension erforderlichen reduzierten Wassergehalts bei der Herstellung in der Suspensionsmischanlage ist der Bindemittelanteil des Warmbetons bei der Herstellung im Realmaßstab geringfügig erhöht (vgl. Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2). In der Folge steigt die Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{tr,10} = 0,108\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ im Labormaßstab auf $\lambda_{tr,10} = 0,118\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ im Realmaß-

stab. Eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit um 11 % bzw. um $0,01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ liegt in derselben Größenordnung wie in [32] beobachtet. Im Vergleich mit einer um 50 % erhöhten Wärmeleitfähigkeit, die in [145] beim Versuch der Übertragung in den Realmaßstab ohne das Durchführen einer Anpassung der im Labor entwickelten Zusammensetzung erzielt wurde, zeigt die in dieser Arbeit vorgestellte Betonzusammensetzung bei der Herstellung in der Suspensionsmischanlage nur geringfügige Abweichungen der zuvor im Labor bestimmten Betoneigenschaften.

Um die Einhaltung der Wärmeleitfähigkeit an Gebäuden überprüfen zu können, bietet sich eine einseitige Messung mittels THB-Verfahren vor Ort an. Erste Versuchsreihen zur Ermittlung eines für den entwickelten Warmbetons spezifischen Korrekturfaktors für die einseitige Messung weisen eine Streuung der Messwerte um die Regressionsgerade auf, die das Durchführen zusätzlicher Messungen nahelegt (vgl. Abbildung 6.20). Die bei Umgebungsfeuchte bestimmten Messwerte weisen eine stärkere Standardabweichung auf und lassen sich nicht in die Messreihen bei definierten Umgebungsbedingungen von 20°C und 50 % r.F. bzw. 80 % r.F. einordnen. Insbesondere für die Messungen bei Umgebungsfeuchte bietet sich eine Wiederholung der Versuchsreihe bei dokumentierter relativer Luftfeuchte an, um die aufgetretene Abweichung einzuordnen und die Güte des Korrekturfaktors k_w zu verbessern.

Die zur Bewertung der Dauerhaftigkeit des Warmbetons betrachtete Wasseraufnahme stieg mit dem Anpassen der Verdichtung an (vgl. Abschnitt 6.4.3). Diese Messwerte bestätigen, dass im Rahmen der Betonentwicklung frühzeitig eine ausreichend lange Verarbeitungsdauer zu betrachten ist. Damit ist die Ermittlung von Betonkennwerten an Probekörpern möglich, die in ihren Eigenschaften annähernd solchen aus der Herstellung im Realmaßstab entsprechen. In der Folge ist wie bei der durchgeführten Betonentwicklung lediglich ein geringfügiger Maßstabseffekt zu beobachten.

7.2. Vergleich mit Holzleichtbeton

Holzleichtbeton zeichnet sich aufgrund der enthaltenen Holzspäne durch eine niedrige Wärmeleitfähigkeit aus. Zudem wirkt sich das im Holz über die Lebensdauer der Bauteile gespeicherte CO_2 positiv auf die Ökobilanz von Holzbeton aus [134, 135]. Auch das aus Altglas hergestellte Blähglas gilt als nachhaltig [91]. Da der ebenfalls am IWB entwickelte Holzbeton mit einer Druckfestigkeit von $26 \text{ N}/\text{mm}^2$ und einer Wärmeleitfähigkeit von $0,68 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ mit Betonstahl bewehrt wird, wird neben dem Zusammenwirken von Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit auch die Carbonatisierung der Betone betrachtet. Der Vergleich der beiden Betone schließt mit einer Ökobilanzierung.

7.2.1. Verwendung organischer Leichtzuschläge

Anknüpfend an die Untersuchungen von Klatt [9] wurde am IWB neben der erforderlichen Schichtdicke für eine wirksame Ummantelung die Zusammensetzung der Ummantelung näher betrachtet.

Da sich die Verwendung von Zusatzstoffen zur Steigerung der Packungsdichte positiv auf die Betoneigenschaften auswirkt, wurde die ursprünglich rein zementgebundene Ummantelung mit Zusatzstoffen abgemischt. Neben der Verwendung von Kalksteinmehlen in unterschiedlicher Mahlfeinheit wurden reaktive Zusatzstoffe wie Flugasche und Metakaolin und die Dicke der aufgetragenen Schicht betrachtet [190]. Die in Tabelle 7.7 aufgeführten Werte für die Wasseraufnahme und Rohdichte der Holzspäne zeigt, dass eine sinkende Wasseraufnahme der Späne mit einer erhöhten Dichte verbunden ist. Die Wirkung wird folglich von der Schichtdicke der aufgetragenen Ummantelung bestimmt. Die um mehr als die Hälfte reduzierte Wasseraufnahme der Holzspäne im Vergleich mit der rein zementgebundenen Ummantelung von CEMWOOD ([191]) bei einem Anstieg der Dichte zwischen 10 M. – % und 30 M. – % zeigt jedoch auch für diese Anwendung eine positive Wirkung von Zusatzstoffen.

Um den Einfluss der Zusammensetzung der Ummantelung auf die Festbetoneigenschaften zu untersuchen, wurde ein selbstverdichtender Mörtel entwickelt, dem jeweils 40 Vol. – % ummantelter Holzspäne zugegeben wurden. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde der Mörtel mit einem konstanten Wassergehalt hergestellt und einem Entmischen bei der Verwendung von Holzspänen mit geringer Wasseraufnahme mit der Zugabe von Stabilisierer entgegengewirkt.

Tabelle 7.7.: Rohdichte und Wasseraufnahme innerhalb 1 h der mineralisierten Holzspäne in Abhängigkeit der Zusammensetzung der Umhüllung

	Modifizierung der Umhüllung			
	Referenz [191]	M1	M2	M3
Wasseraufnahme _{1h} [M. – %]	44	19	13	18
Rohdichte [kg/m ³]	735	815	1005	875

7.2.2. Festbetoneigenschaften von Holzleichtbeton

Im Gegensatz zum Warmbeton, bei dem sowohl Gesteinskörnung als auch Matrix porosiert sind, enthält der betrachtete Holzbeton kaum Luftporen. Entsprechend höher sind die in Tabelle 7.8 zusammengefassten Werte der Trockenrohichte, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Bei Holzbeton A wurde der Holzgehalt auf 40 Vol. – % festgelegt und das Volumen der feinen Gesteinskörnung so gewählt, dass für die Gesteins-

Tabelle 7.8.: Festbetoneigenschaften von Warmbeton und Holzleichtbeton im Vergleich

	Warmbeton	Holzleichtbeton	
		A	B [134]
Packungsdichte _{Gesteinskörnung} g^* [-]	0,8237	0,7139	0,5811
Packungsdichte _{Beton} Φ^* [-]	0,8622	0,8666	0,7758
Trockenrohddichte [kg/m ³]	480	1720	1560
Druckfestigkeit [N/mm ²]	5	26	17
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10, \text{tr}}$ [W/(m · K)]	0,11	0,68	0,47

körnung die maximale Packungsdichte erreicht wird. Bei einer Trockenrohddichte von 1720 kg/m³ wird eine Druckfestigkeit von 26 N/mm² bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,68 W/(m · K) erreicht. Die Druckfestigkeit des Mörtels liegt bei 80 N/mm². Wird statt der gewählten Bindemittelzusammensetzung das Nanodur-Compound von Dyckerhoff [192] verwendet, das für die Herstellung ultrahochfester Betone entwickelt wurde, steigt die Betonfestigkeit auf 34,5 N/mm².

Eine Erhöhung des Holzgehalts auf 48,6 Vol. – % (Holzbeton B) reduziert die Dichte, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit auf 1560 kg/m³, 17 N/mm² und 0,47 W/(m · K). Die durch den hohen Holzgehalt deutlich reduzierte Packungsdichte von Holz und feiner Gesteinskörnung ist durch Zusatzstoffe nicht ausgleichbar, wodurch die Festigkeit vermutlich weiter reduziert wird.

Beide Holzbetone sind gefügedicht und zur Ausbildung einer tragenden Schicht geeignet, die um eine wärmedämmende Schicht zu ergänzen ist. Die sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit von nichttragenden Wärmedämmmaterialien ermöglicht dabei eine geringere Wandstärke als bei monolithischer Ausführung mit Warmbeton.

Auch wenn mit der Verwendung einer höherfesten Matrix eine Festigkeitssteigerung um 25 % möglich war, fällt an dem in Abbildung 7.7 c gezeigten Bruchbild von Holzbeton A auf, dass der Beton überwiegend in der Kontaktzone zwischen Holz und Ummantelung versagt. Während in [9] bei Druckfestigkeiten von 19 N/mm² überwiegend ein Bruch durch die Holzspäne beobachtet und mit einem guten Verbund zwischen Holzspänen und Ummantelung in Verbindung gebracht wird, verlagert sich die Schwachstelle bei höheren Betonfestigkeiten zur Kontaktzone zwischen Holz und Umhüllung. Als Alternative zur Verwendung einer hochfesten, verarbeitungs- und kostenintensiven Matrix wurde am IWB die Ummantelung der Späne modifiziert, um den Verbund zwischen Holzspan und Ummantelung zu verbessern.

Sowohl das für Leichtbeton typische Bruchbild in Abbildung 7.7 d mit dem Versagen der Holzspäne als auch die mit der modifizierten Ummantelung erreichte Festigkeitssteigerung des Betons bestätigen die Verbesserung der Kontaktzone. Wie bei der Verwendung von Blähglas in Abbildung 7.7 a tritt Kornbruch auf. Werden dagegen unbehandelte Holzspäne verwendet, verzögert sich die Hydratation und die Matrix wird insbesondere

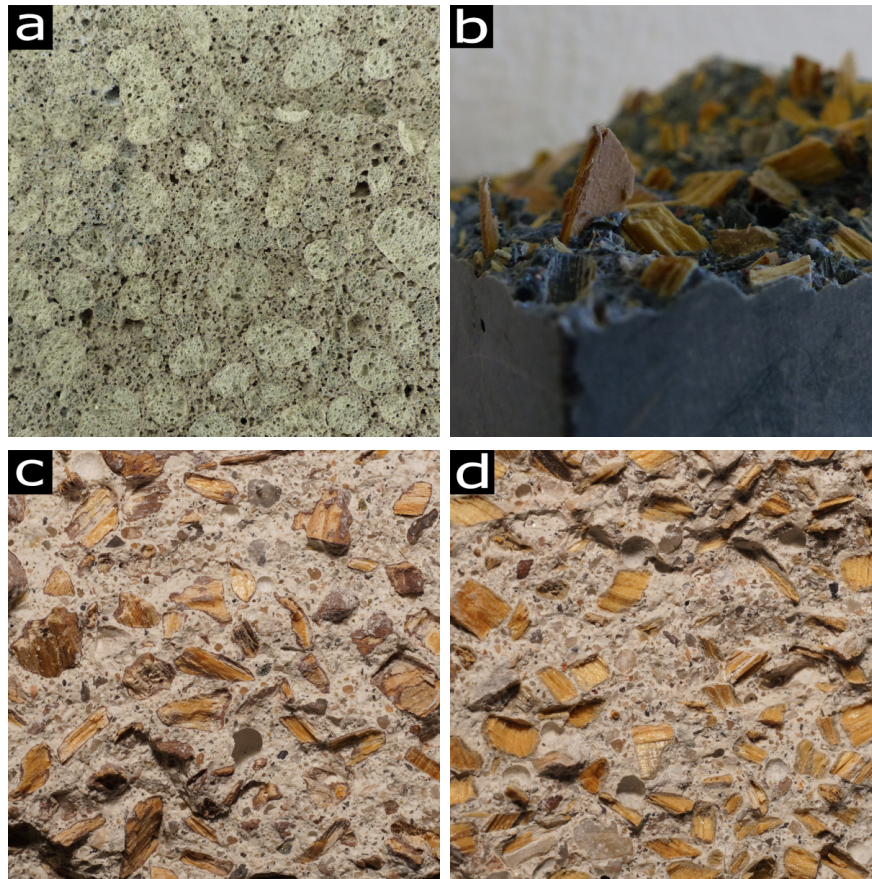


Abbildung 7.7.: Einfluss der Kontaktzone auf das Bruchbild von Leichtbeton, a) die im Vergleich zum Blähglas höhere Matrixfestigkeit führt zu Kornbruch, b+c) geschwächte Kontaktzone zwischen Holz und Zementstein bzw. Ummantelung und d) Kornbruch durch die mittels Modifizierung der Ummantelung mit Zusatzstoffen verbesserte Kontaktzone zwischen Holz und Ummantelung

in der Kontaktzone geschwächt. Dies führt zu einem Auszug der Späne im entstehenden Riss (vgl. Abbildung 7.7 b).

Die mittels der modifizierten Umhüllung erzielte Festigkeitssteigerung entspricht nahezu der, die mit der Verwendung des Nanodur-Compounds möglich ist. Die in Tabelle 7.9 zusammengefassten Druckfestigkeiten zeigen einen Anstieg von 26 N/mm^2 bei einer rein zementgebundenen Ummantelung auf 29 N/mm^2 bis 33 N/mm^2 bei einer Abmischung des Zements mit Metakaolin bzw. mit Kalksteinmehl und Flugasche. Aufgrund der Spanform ist die Biegezugfestigkeit im Verhältnis zur Druckfestigkeit auffallend hoch. Bei der Verwendung unbehandelter Holzspäne wurde der Holzanteil aus Gründen der Verarbeitbarkeit auf $38,5 \text{ Vol.} - \%$ reduziert. Trotz des geringeren Anteils an Leichtzuschlag liegt die Druckfestigkeit infolge der hydrationsinhibierenden Wirkung der Späne nach 28 Tagen bei nur $16,8 \text{ N/mm}^2$. Die Verzahnung der Risse durch die Späne führt jedoch auch hier zu einer mit $5,6 \text{ N/mm}^2$ hohen Biegezugfestigkeit.

Tabelle 7.9.: Biegezug- und Druckfestigkeit des Holzleichtbetons bei volumengleichem Austausch der mineralisierten Späne

Leichtzuschlag	Referenz [191]	Modifizierung der Umhüllung		
		M1	M2	M3
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	6,4	7,9	8,1	7,9
Druckfestigkeit [N/mm ²]	26	29	33	30

7.2.3. Dauerhaftigkeit von Holzleichtbeton

Am IWB wurden Betonproben mit wechselnder relativer Luftfeuchte beaufschlagt, um die Auswirkungen der hygri-schen Formänderungen der Holzspäne auf die Kontaktzone zu betrachten. Im Gegensatz zu der in Abschnitt 6.4.2 geschilderten Klimalagerung wurden die Probekörper zur Untersuchung des Carbonatisierungsverhaltens zusätzlich mit 6 % CO₂ beaufschlagt. Der dadurch beschleunigte Carbonatisierungsfortschritt ermöglicht das Abschätzen der Dauerhaftigkeit in einem verhältnismäßig kurzen Zeitraum.

Bis zum Betonalter von 140 Tagen war trotz der hygri-schen Formänderungen eine geringe Nacherhärtung sowohl des Holzbetons als auch der Referenzproben, die Blähglas anstelle der Holzspäne enthalten, zu beobachten. Der Carbonatisierungsfortschritt wurde sowohl an Prismen mit einem Querschnitt von 40 mm auf 40 mm als auch an Balken mit einem Querschnitt von 100 mm auf 100 mm betrachtet. An den in Tabelle 7.10 zusammengefassten Werten ist auffällig, dass die Carbonatisierung des rein mineralischen Leichtbetons unabhängig von der Probekörpergeometrie voranschreitet, wohingegen die Messung am Holzbeton einen klaren Maßstabseinfluss offenbart. Die an Balken deutlich schneller ablaufende Carbonatisierung deutet auf ein Ansteifen des Frischbetons und eine damit einhergehende schlechtere Verarbeitbarkeit hin, die zu einem weniger dichten Gefüge des Betons führt. Der an den Balken aus Holzleichtbeton gemessene Carbonatisierungsfortschritt ist bei den gewählten Lagerungsbedingungen mit denen eines Normalbetons der Druckfestigkeitsklasse C30/37 vergleichbar. Am Normalbeton wurden nach dem Ende des Beobachtungszeitraums ebenfalls Carbonatisierungstiefen von rund 7 mm gemessen. Auch wenn der Schnelltest nicht auf mangelnde Dauerhaftigkeit hinweist, so wird doch deutlich, dass die Verarbeitbarkeitsdauer des Holzbetons für eine Übertragung in den Realmaßstab näher zu untersuchen ist. Weitere Einschränkungen entstehen daraus, dass die Wasseraufnahme der Holzspäne nicht nur von der Ummantelung und der Verarbeitungsdauer, sondern auch von Art und Alter des verwendeten Holzes abhängig ist. Dadurch ist das kontinuierliche Überprüfen der Zuschlagseigenschaften für das sichere Einstellen von Frischbetonstabilität und Konsistenz unumgänglich.

Tabelle 7.10.: Carbonatisierungsverhalten von Holzbeton und konventionellem Leichtbeton im Schnelltest [193]

Beobachtungsdauer [d]	Carbonatisierungstiefe [mm]					
	Holzleichtbeton			konv. Leichtbeton		
	28	56	112	28	56	112
Prismen (40 mm × 40 mm × 160 mm)	0,6	0,8	1,3	2,5	3,8	4,6
Balken (100 mm × 100 mm × 600 mm)	5,0	7,4	7,8	2,2	3,8	4,6

7.2.4. Ökobilanzierung

Für einen Vergleich auf Bauteilebene wurde eine 50 cm dicke monolithische Wand aus Warmbeton mit einer Wand mit gleichem U-Wert von $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ aus Holzleichtbeton und Wärmedämmung betrachtet.

Wirkungsabschätzung

Unter der Vernachlässigung der Nutzungsphase, die für Wohngebäude beider Wandaufbauten gleich anzunehmen ist, ist die Wirkungsabschätzung des monolithischen Wandaufbaus aus Warmbeton in Tabelle 7.11 und die des Wandaufbaus mit Holzleichtbeton in Tabelle 7.12 zusammengefasst. Durch das während des Baumwachstums der Atmosphäre entnommene CO_2 , das über die gesamte Lebensdauer in den Holzspänen gebunden bleibt, ist der Holzbeton hinsichtlich des Treibhauspotentials sehr positiv zu bewerten. Aber auch in den übrigen Wirkungskategorien wird die Verwendung von Holzbeton mit zusätzlicher Wärmedämmung als emissionsärmer und ressourcenfreundlicher eingestuft als der monolithische Wandaufbau aus Warmbeton.

Insbesondere der Primärenergiebedarf und das Treibhauspotential für die Herstellung von Warmbeton ist höher als für konventionelle Betone. Hierbei macht sich die energieintensive Herstellung von Blähglas bemerkbar. Auch die längeren Transportwege, die bei der Verwendung von Blähglas anfallen, tragen zu einer Steigerung der Emissionen bei, ebenso wie die Verwendung von Glasfaserbewehrung. Durch die Wandstärke von 50 cm wird für die gleiche Wandfläche fast das dreifache Betonvolumen benötigt. Dieses Volumen findet sich in dem ebenfalls ca. dreifach höheren Primärenergiebedarf des Warmbetons wieder. In [8] wird für eine Infralichtbetonwand im Vergleich mit einem Wandaufbau mit Wärmedämmverbundsystem ebenfalls ein um das drei- bis fünffache erhöhter Primärenergiebedarf angegeben. Ein Vergleich auf Gebäudeebene zeigte hier jedoch einen deutlichen Einfluss der Nutzungsphase, so dass sowohl Primärenergiebedarf als auch Treibhauspotential nur 5 % bis 10 % über dem des Referenzgebäudes liegen.

In [172] wird ebenfalls ein konventioneller Wandaufbau aus einem Normalbeton mit zusätzlicher Wärmedämmung betrachtet. Da für eine bessere Vergleichbarkeit U-Wert und Wärmedämmschicht gleich gewählt wurden, führte die erforderliche Wandstärke

Tabelle 7.11.: Wirkungsabschätzung der gewählten funktionellen Einheit einer monolithischen Wand aus Warmbeton

	PEe [MJ]	PEne [MJ]	GWP [kg CO ₂ – Äq.]	AP [kg SO ₂ – Äq.]	ODP [kg R11 – Äq.]	EP [kg PO ₄ ³⁻ – Äq.]
Herstellung Betonausgangsstoffe	184,01	1173,39	83,04	0,2061	$3,89 \cdot 10^{-9}$	0,0397
Herstellung Bewehrung	9,76	658,58	43,36	0,1549	0,0031	0,0266
Transport	3,47	54,92	3,78	0,0170	$7,76 \cdot 10^{-12}$	0,0043
Betonherstellung und Einbau	4,43	13,02	0,94	0,0014	$2,64 \cdot 10^{-11}$	0,0002
End of Life	-62,90	-557,69	-3,34	-0,1619	-0,0013	0,0010
Σ	138,77	1342,22	127,77	0,2175	0,0018	0,0700

Tabelle 7.12.: Wirkungsabschätzung der gewählten funktionellen Einheit eines Wandaufbaus mit Holzleichtbeton

	PEe [MJ]	PEne [MJ]	GWP [kg CO ₂ – Äq.]	AP [kg SO ₂ – Äq.]	ODP [kg R11 – Äq.]	EP [kg PO ₄ ³⁻ – Äq.]
Herstellung Betonausgangsstoffe	20,82	104,30	-87,72	0,0744	$4,94 \cdot 10^{-10}$	0,0126
Herstellung Bewehrung, Dämmung und Mörtel	23,13	52,72	3,70	0,0187	$1,34 \cdot 10^{-6}$	0,0045
Transport	3,13	52,72	3,70	0,0187	$1,73 \cdot 10^{-11}$	0,0041
Herstellung Wandaufbau	1,76	5,38	0,38	0,0006	$1,62 \cdot 10^{-11}$	0,0001
End of Life	-6,53	-193,14	-3,32	-0,0328	$-2,22 \cdot 10^{-09}$	-0,0023
Σ	42,31	483,22	-69,09	0,1097	$1,34 \cdot 10^{-0,6}$	0,0189

verglichen mit dem Wandaufbau aus Holzleichtbeton sowohl zu einem höheren Energiebedarf als auch zu höheren Emissionen. Der höhere Energiebedarf ist hier jedoch eine Folge des in dem betrachteten Normalbeton enthaltenen Portlandzements. Wird der Wandaufbau mit derselben Geometrie ausgeführt und der Normalbeton ebenfalls mit einem Hochofenzement hergestellt, unterscheiden sich die beiden Wandaufbauten in erster Linie durch das Treibhauspotential.

7.3. Vergleich mit Porenbeton

Für einen Vergleich des entwickelten Warmbetons wurden Porenbetonsteine der Festigkeitsklasse 4 gewählt, die mit einer Druckfestigkeit von $> 5 \text{ N/mm}^2$ und einer Rohdichte von ca. 500 kg/m^3 ähnliche Eigenschaften aufweisen. Zylinderdruckfestigkeit, E-Modul und Kriechverhalten des Porenbetons wurde an aus den Steinen geschnittenen Zylindern mit einer Höhe von 30 cm und einem Durchmesser von 15 cm ermittelt.

Für die bessere Vergleichbarkeit, sowohl mit den am IWB mittels THB-Verfahren bestimmten Messwerten als auch mit dem im Plattenverfahren ermittelten Referenzwert des Warmbetons, wurde der Porenbeton abweichend von der Empfehlung in [101] für die Messung der Wärmeleitfähigkeit getrocknet.

7.3.1. Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit

Tabelle 7.13 gibt eine Übersicht über die ermittelten Festbetonkennwerte. Die Zylinderdruckfestigkeit des Porenbetons liegt rund 8% über der des Warmbetons, der E-Modul ist dagegen um ein Drittel niedriger. Die im Anschluss an die für die Messung der Wärmeleitfähigkeit erforderliche Trocknung der Probekörper ermittelte Trockenrohichte beträgt bei beiden Betonen 480 kg/m^3 , mit $0,11 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ist der Messwert der Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons niedriger als der des Porenbetons mit $0,13 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$. In beiden Fällen sind Prüffläche und Probekörper von Poren durchsetzt, so dass sich die niedrige Wärmeleitfähigkeit des Blähglases positiv auf die Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons auswirkt.

Die in Tabelle 6.17 gegebene Übersicht zum Einfluss der Umgebungsfeuchte auf die Messwerte der Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons zeigt, dass der Feuchtegehalt des Betons die Wärmeleitfähigkeit zwar beeinflusst, jedoch nicht so deutlich wie in [101] für Porenbeton mit einer Zunahme der Wärmeleitfähigkeit um 42% je M. – % Feuchtezunahme angegeben. Die bei Ausgleichsfeuchte mit der Umgebung ermittelte Differenz der Masse gibt für den Warmbeton einen Feuchtegehalt von 5,5 M. – % an. Damit geht eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von nur 12% einher.

Tabelle 7.13.: Festbetoneigenschaften von Warmbeton und Porenbeton der Festigkeitsklasse 4 im Vergleich

	Warmbeton	Porenbeton
Trockenrohddichte [kg/m ³]	480	480
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{tr,10}$ [W/(m · K)]	0,11	0,13
Zylinderdruckfestigkeit [N/mm ²]	4,9	5,3
E-Modul [N/mm ²]	2730	2070

7.3.2. Kriechverhalten

Neben dem E-Modul deutet auch das Kriechverhalten darauf hin, dass das im Warmbeton enthaltene Korngerüst aus Blähglas die Materialeigenschaften positiv beeinflusst. Die in Tabelle 7.14 angegebene deutlich höhere elastische Verformung des Porenbetons von 0,901 $\mu\text{m}/\text{mm}$ unmittelbar nach dem Aufbringen der Belastung führt nach 175 Tagen zu einer Gesamtverformung von 1,169 $\mu\text{m}/\text{mm}$. Aufgrund der Prüfbedingungen bei konstanter Luftfeuchtigkeit ist am Porenbeton kein Schwinden messbar. Entsprechend liegt das Kriechmaß bei 0,268 $\mu\text{m}/\text{mm}$, vgl. Tabelle 7.14. Nach [51] bedeutet die nach DIN EN 12602 [194] für Porenbeton anzunehmende Kriechzahl $\varphi_\infty = 1,0$, dass der zeitabhängige Verformungszuwachs im Gebrauchslastbereich, also bei einer Belastung mit bis zu 40 % der Druckfestigkeit, ungefähr der elastischen Anfangsverformung entspricht. Dies würde für den durchgeführten Kriechversuch bei fortgesetzter Belastung eine deutliche Steigerung der Kriechverzerrung erwarten lassen. Die nach 175 Tagen bereits stark abgeflachte Messkurve steht dazu im Widerspruch (vgl. Abbildung 6.9). Die im Vergleich zum Warmbeton höhere Kriechverzerrung des Porenbetons führt aufgrund der annähernd gleichen Festigkeit und Belastung zu einem entsprechend höheren belastungsbezogenen spezifischen Kriechmaß. Die Kriechzahlen der betrachteten Betone sind dagegen vergleichbar.

Beanspruchungen oberhalb des Gebrauchslastbereichs führen bei Porenbeton innerhalb kurzer Zeit zu irreversiblen Strukturänderungen [51]. Aufgrund der vergleichbaren Dichte und Porosität ist bei hoch beanspruchtem Warmbeton ebenfalls eine Formänderung zu erwarten.

Tabelle 7.14.: Kriechverhalten von Warmbeton und Porenbeton der Festigkeitsklasse 4 bei einer Belastungsdauer von 175 Tagen

	Warmbeton	Porenbeton
Elastische Anfangsverformung [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	0,704	0,901
Kriechmaß $_{175d}$ [$\mu\text{m}/\text{mm}$]	0,206	0,268
Spezifisches Kriechmaß $_{175d}$ [$(\mu\text{m}/\text{mm}) / (\text{N}/\text{mm}^2)$]	0,125	0,162
Kriechzahl $\varphi(175d, t_0)$ [–]	1,292	1,297

8. Zusammenfassung und Ausblick

Der entwickelte Warmbeton hält den geforderten Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_B \leq 0,140 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ein. Damit ist unter Einhaltung der EnEV ein monolithischer Wandaufbau mit einer Wandstärke von 50 cm möglich. Mit dem über eine Verarbeitungsdauer von 3 Stunden ermittelten Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von $0,125 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ wird der geforderte U-Wert von $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ bereits mit 42,5 cm dicken Wänden eingehalten. Eine geringere Wandstärke und der damit verbundene Raumgewinn stärken die Attraktivität von Warmbeton und die Konkurrenzfähigkeit im Vergleich mit konventionellen Wandaufbauten. Die konstruktive Ausbildung von zweigeschossigen Wohngebäuden ist mit der Druckfestigkeit von $5,1 \text{ N}/\text{mm}^2$ ebenfalls sichergestellt.

Im Vergleich mit Infralichtbetonen, die bereits für Bauvorhaben eingesetzt wurden, weist der entwickelte Warmbeton auch neben der sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit positive Materialeigenschaften auf. Neben deutlich reduzierten Schwind- und Kriechverzerrungen wurde eine vergleichbare Verbundspannung zur Bewehrung ermittelt. Lediglich der im Ausziehversuch beobachtete sehr geringe Schlupf deutet darauf hin, dass die Reduzierung der Dichte mit einer erhöhten Sprödheit des Warmbetons einhergeht (vgl. Abschnitte 7.1.6, 7.1.7 und 7.1.5). Die guten mechanischen Eigenschaften des Warmbetons spiegeln sich auch in dem Verhältnis von Festigkeit zu Rohdichte, dass das von konventionellen haufwerksporigen Leichtbetonen übertrifft. Eine Abschätzung des E-Moduls nach DIN EN 1520 [12] ist möglich (vgl. Abschnitt 7.1.3).

Die mit $0,010 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})/(\text{N}/\text{mm}^2)$ sehr niedrige auf die Druckfestigkeit normierte Wärmeleitfähigkeit des Zementsteins zeigt das Potential zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit, sofern Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit in ihrem Zusammenwirken betrachtet werden (vgl. Abschnitt 7.1.4). Die Festigkeit des Zementsteins beträgt etwa das Dreifache der Betonfestigkeit, die von der geringen Festigkeit des Blähglases maßgeblich beeinflusst wird. Insbesondere die groben Fraktionen zeichnen sich zwar durch eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit aus, weisen jedoch auch die niedrigsten Kornfestigkeiten auf. Mit einer Reduzierung des Größtkorns oder des Blähglasgehalts ist eine Festigkeitssteigerung möglich. Allerdings sind Verarbeitbarkeit und Stabilität bei einer veränderten Zusammensetzung der Gesteinskörnung anzupassen, da die

feinen Fraktionen über die größere spezifische Oberfläche einen höheren Anteil des Anmachwassers binden. Gleichzeitig ist auch mit einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit zu rechnen.

Warmbeton ist konstruktiv für die selben Anwendungen einsetzbar wie Porenbeton. Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit im Ausgleichszustand mit der Umgebungsfeuchte fällt jedoch deutlich geringer aus. Während Außenwände aus Porenbeton verputzt werden, sind monolithisch ausgeführte Sichtbetonaußenwände der Bewitterung ausgesetzt. Die im Labor ermittelte Wärmeleitfähigkeit ist mit vergleichenden Messungen an Bauteilen unter realem Witterungseinfluss abzusichern. Hierfür wurde mit der Ermittlung eines Korrekturfaktors begonnen (vgl. Tabelle 6.17). Der geringe Stichprobenumfang erlaubt jedoch keine ausreichend genaue Einschätzung bei realen Umgebungsbedingungen. Als Grundlage für weiterführende Untersuchungen ermöglicht er dennoch vergleichende Messungen an Gebäuden. Zudem empfiehlt sich eine Überprüfung der Zunahme der Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons über die Verarbeitungsdauer. Wird ein Transportweg von einer Stunde zur Baustelle eingeplant, beginnt der Verarbeitungszeitraum erst eine Stunde nach Mischende. Verarbeitbarkeit, Luftporengehalt und damit auch die Festbetoneigenschaften werden folglich von der Konsistenz im Zeitraum zwischen einer und drei Stunden nach Mischende bestimmt. Entsprechende Untersuchungen würden in der Praxis die Ausgabe verschiedener Einstufungen von Konsistenz und Wärmeleitfähigkeit unter Bezugnahme auf die jeweilige Situation vor Ort ermöglichen.

Fließt die Betrachtung der Packungsdichte von Beginn der Betonentwicklung an in die Identifizierung geeigneter Ausgangsstoffe und möglicher Bindemittelkombinationen ein, ist die Herstellung robuster Betone möglich (vgl. Abschnitt 2.1).

Im Rahmen der durchgeführten Mischungsentwicklung wurde eine Vielzahl an Zusatzstoffen und -mitteln, insbesondere LP-Bildner, betrachtet (vgl. Abschnitte 3.1.3 und 5.1). Der Warmbeton enthält mit dem Zement, dem gebrannten Tonmehl, dem Silikastaub und dem stabilisierenden Compound neben der Gesteinskörnung vier Feststoffe, die im Betonwerk zu bevorraten und zu dosieren sind. Mit einer Reduzierung ginge eine Verringerung von Kosten und Aufwand und damit eine Stärkung der Konkurrenzfähigkeit einher. Hierfür ist der Austausch des verwendeten Hochofenzements durch einen CEM III/B ein möglicher Ansatzpunkt. In Kombination mit nur einem festigkeitsbildenden Zusatzstoff ist mithilfe des erhöhten Hüttensandgehalts eine vereinfachte Zusammensetzung denkbar. Damit geht jedoch eine verringerte Optimierungsmöglichkeit in Bezug auf die Packungsdichte einher. Die hierdurch entstehenden Auswirkungen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften sind im Vorfeld sorgfältig zu prüfen.

Robuste Betone sind unempfindlich gegenüber Schwankungen der Ausgangsstoffe oder geringfügigen Änderungen der Zusammensetzung, die bei der Anpassung auf einen anderen Mischer erforderlich sind. Wird zudem der aus Mischergeometrie und

Mischwerkzeuggeschwindigkeit resultierende Energieeintrag beachtet, ist bereits im Labormaßstab das Einstellen eines Mischregimes möglich, das auf die Übertragung auf den Produktionsmischer ausgerichtet ist (vgl. Abschnitt 2.2.1). Auf dieser Grundlage war das Beibehalten der Zusammensetzung von Bindemittel und Blähglas des Warmbetons bei der Übertragung vom Laborsuspensionsmischer auf die Suspensionsmischanlage möglich. Lediglich die Zugabemenge von Wasser und Luftporenbildner war für nahezu gleichbleibende Frisch- und Festbetoneigenschaften anzupassen (vgl. Abschnitt 5.2).

Im Rahmen der Anpassung der Mischungszusammensetzung an die Suspensionsmischanlage war aufgrund der schlechteren Deagglomeration der Feinstoffe eine Reduzierung des Wassergehalts erforderlich. Ein unvollständiger Aufschluss des Bindemittels senkt die Viskosität der Suspension. Sowohl bei der Verwendung von leichter Gesteinskörnung als auch einem hohen Luftporengehalt ist eine hohe Viskosität jedoch unabdingbar, um ein Entlüften zu vermeiden und die Frischbetonstabilität zu gewährleisten. Wird die Suspensionsmischanlage mit perforierten Blattrührern ausgerüstet, ist das Herstellen des Bindemittelleims in der gleichen Qualität wie im Labormaßstab möglich.

Als Alternative zur Herstellung von Warmbeton in einer Suspensionsmischanlage wurde die Herstellung in einem Konusmischer betrachtet. Dabei wurde ebenfalls der gewünschte sehr hohe Luftporengehalt im Beton erzielt. Die Mischpaddel des hierfür verwendeten Konus-Labormischers KKM R-30 sind mit Stiften versehen, die ebenso wie perforierte Blattrührer in Suspensionsmischern eine hohe Mischintensität sicherstellen [27]. Die Mischerform ermöglicht ein zweistufiges Mischregime in nur einem Mischer, wodurch die Herstellung vereinfacht wird. Auch wenn der Aufschluss und damit die Stabilität von Suspensionen in Suspensionsmischern optimal ist, ist die Herstellung von Warmbeton im Konusmischer möglich und eine Alternative zu dem in dieser Arbeit vorgestellten Mischregime. Ist die Herstellung von Warmbeton nicht auf einen bestimmten Mischerbautyp begrenzt, erleichtert dies die Anwendung der durchgeführten Betonentwicklung in der Praxis.

Durch die Beachtung der Übertragbarkeit in den Realmaßstab von Beginn der Mischungsentwicklung an ist der Maßstabeffekt vernachlässigbar klein. Für die Druckfestigkeit wurden unabhängig vom verwendeten Mischertyp gleichbleibende Werte ermittelt. Mit der Betrachtung einer längeren Verarbeitbarkeitsdauer wurde deutlich, dass die Verdichtung für sehr leichte Betone anzupassen ist (vgl. Abschnitt 5.3). Anschließend wurden auch über den gewählten Beobachtungszeitraum von bis zu 3 Stunden nach Mischbeginn annähernd gleichbleibende Festigkeiten erzielt. Diese Festigkeiten werden ebenfalls bei niedrigeren Umgebungstemperaturen während Herstellung und Erhärtung des Warmbetons erreicht (vgl. Abschnitt 6.3.1). Da höhere Temperaturen die Hydratation beschleunigen und die Konsistenz hin zu einem schnelleren Ansteifen des Frischbetons beeinflussen, empfiehlt sich mit Blick auf Bautermine im Sommer eine

Überprüfung der erforderlichen Verdichtung für die Herstellung und Verarbeitung bei Temperaturen deutlich über 20 °C.

Zudem beeinflusst die Verdichtung die für Sichtbeton wichtige Oberflächenqualität der Bauteile (vgl. Abbildung 5.3). Glatte porenfreie Oberflächen sind aufgrund des hohen Luftporengehalts zwar nicht möglich. Mit einer geeigneten Verdichtung wird dennoch eine optisch ansprechende Oberfläche erreicht.

Da Luftporen im Frischbeton nicht vollständig stabil sind, ändert sich das Porengefüge mit steigender Verarbeitungsdauer. Die Verschiebung der Porengrößenverteilung hin zu größeren Luftporen wurde im Bereich der Poren mit Durchmessern $\geq 170 \mu\text{m}$ ebenfalls über einen Zeitraum von 3 Stunden beobachtet (vgl. Abschnitt 6.3.5). Die enthaltenen Luftporen beeinflussen die Wärmeleitfähigkeit des Warmbetons maßgeblich (vgl. Abschnitt 6.3.7). Aus den erforderlichen Anpassungen der Zusammensetzung für die Herstellung in der Suspensionsmischanlage resultiert ein verändertes Gefüge, das den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit um $0,01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ mit sich bringt. Dieser Anstieg der Wärmeleitfähigkeit ist in erster Linie auf die fehlende Perforierung des Mischwerkzeugs der Mischanlage und nicht auf das Betonvolumen oder den Verarbeitungszeitpunkt zurückzuführen und bestätigt damit, dass bereits bei der Mischungsentwicklung im Labor der Mischertyp des Produktionsmischers zu berücksichtigen ist.

Im Zuge der Nachhaltigkeitsdebatte, die maßgeblich zur Entwicklung sehr leichter Betone mit niedriger Wärmeleitfähigkeit beigetragen hat, ist die Ökobilanzierung in die Betrachtung verschiedener Wandaufbauten und Gebäude einzubeziehen. Die Wirkungsabschätzung des Warmbetons fällt aufgrund der energieintensiven Herstellung von Blähglas sowie des großen Betonvolumens bei einer Wandstärke von 50 cm sowohl mit einem hohen Primärenergiebedarf als auch mit einem großen Treibhauspotential auf (vgl. Abschnitt 7.2.4). Bedingt durch die hohe innere Oberfläche des porösen Warmbetons sind in der Nutzungsphase im Vergleich mit konventionellen Wandaufbauten jedoch Energieeinsparungen bei der Gebäudeklimatisierung zu erwarten. Um das Einsparpotential abzuschätzen und abzuwägen, in welchem Maß ein verringerter Energiebedarf während der Nutzungsphase den erhöhten Primärenergiebedarf während der Herstellungsphase ausgleicht, sind weiterführende Untersuchungen notwendig. Ist eine weitere Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit und damit eine Reduzierung der Wandstärke möglich, lässt sich der Widerspruch zwischen dem Verzicht auf eine Wärmedämmung, die nach der Nutzungsdauer aufwendig vom Beton getrennt werden muss, und einem hohen Energiebedarf und Emissionsausstoß für die Betonherstellung weiter verringern.

A. Anhang

A.1. Betonzusammensetzungen

Tabelle A.1.: Zusammensetzung von Warmbeton E

Material	Rohdichte [kg/m ³]	Stoffraum [dm ³ /m ³]	Masse [kg/m ³]
CEM III/A 42,5 N	3000	38,4	115,3
Gebranntes Tonmehl	2700	11,9	32,0
Schleifstaub	2320	13,8	32,0
Blähglas 0,25/0,5	512	119,3	61,1
Blähglas 1/2	381	48,6	18,5
Blähglas 2/4	310	90,6	28,1
Blähglas 4/8	286	94,9	27,1
Blähglas 8/16	282	247,4	69,8
Wasser	1000	57,6	57,6
Fließmittel Sika G-2	1090	11,5	12,6
Luftporenbildner TM 89/29 E	1000	1,8	1,8
Luftporen		260	
Dichtungsmittel TM Hydrophob	1010	1,4	1,4
Summe		1000	461,9

Tabelle A.2.: Betonzusammensetzungen zu Beginn der Mischungsentwicklung; Trockenrohichte, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Betone 1 bis 8 sind in Tabelle 5.2 aufgeführt

Material	Rohdichte [kg/m ³]	Stoffraum [dm ³ /m ³]							
		Beton 1	Beton 2	Beton 3	Beton 4	Beton 5	Beton 6	Beton 7	Beton 8
CEM III/A 42,5 N	3000	92,4	84,8	86,5	60,8	67,9	42,4	42,8	34,1
Gebranntes Tonmehl	2700				18,8	17,9	13,1	13,2	12,9
Schleifstaub	2320				21,8	20,8	15,2	15,4	15,0
Glasmehl SW	2480	110,9	37,7	48,4					
Silikastaub RW-Füller	2300								7,7
Kalksteinmehl Easyflow	2650	22,0	53,3	9,6					
Blähglas 0,25/0,5	512	129,7	128,3	136,7	129,1	123,0	131,1	130,6	129,8
Blähglas 0,5/1,0	435	51,2							
Blähglas 1/2	381	70,1	52,2	55,6	52,6	50,1	47,1	45,9	52,9
Blähglas 2/4	310	152,0	97,6	103,7	98,1	93,4	97,6	89,1	98,6
Blähglas 4/8	286	31,8	102,1	108,6	102,7	97,8	104,7	105,7	103,2
Blähglas 8/16	282	167,2	266,0	283,3	166,5	255,1	306,2	275,8	269,2
Aerogelgranulat	70						9,4	47,4	
Wasser	1000	114,7	94,2	86,5	91,2	86,9	63,6	64,3	62,7
Fließmittel Sika G-2	1090	16,3	17,0	16,5	18,2	17,4	12,7	12,8	12,5
Fließmittel Sika ViscoFlow 30	1090	4,1							
Luftporenbildner TM 89/29 E	1000		2,5	2,6	2,8	2,7	2,9	2,0	2,0
SikaAer Solid	200	17,5							
Beschleuniger Lafarge A2	1000								8,2
Beschleuniger Isola Isofrost: KC 45	1430						3,6	3,6	
Dichtungsmittel TM Hydrophob	1010		2,0	2,1	2,3	2,1	1,8	1,6	1,6
Betonverzögerer TM K con. 18 %	1070		2,4						
Luftporen		20	60	60	235	175	150	150	190
Summe		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Tabelle A.3.: Betonzusammensetzungen aus der Weiterentwicklung der ersten Mischungsentwürfe; Trockenrohichte, Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit der Betone I bis IV und A bis D sind in Tabelle 5.3 aufgeführt

Material	Rohdichte [kg/m ³]	Stoffraum [dm ³ /m ³]							
		Beton I	Beton II	Beton III	Beton IV	Beton A	Beton B	Beton C	Beton D
CEM III/A 42,5 N	3000	33,9	32,6	32,8	36,8	37,3	35,7	34,2	32,4
Gebranntes Tonmehl	2700	17,8	15,7	26,9	23,2	23,5	22,5	21,6	20,4
Schleifstaub	2320	7,9	11						
Silikastaub RW-Füller	2300	7,7	7,4	7,4	7,3	7,5	7,2	6,9	6,5
Blähglas 0,25/0,5	512	129,1	124	124,8	125,4	133,8	135,2	137,2	137,9
Blähglas 1/2	381	52,6	50,5	50,8	51,1	54,5	55,1	55,9	56,2
Blähglas 2/4	310	98,1	94,2	94,8	95,0	101,6	107,5	109,2	109,6
Blähglas 4/8	286	102,7	98,6	99,3	99,8	106,4	107,5	109,2	109,6
Blähglas 8/16	282	267,9	257,1	258,9	260,2	277,5	280,4	284,8	286,0
Wasser	1000	54,3	52,1	52,4	52,7	53,4	51,1	49,0	46,3
Fließmittel Sika G-2	1090	12,5	12,0	12,1	12,1	13,1	11,7	11,3	10,6
Luftporenbildner TM 89/29 E	1000	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,7
Beschleuniger Lafarge A2	1000	12,2	11,7	11,8	13,2	13,4	12,8	12,5	11,6
Dichtungsmittel TM Hydrophob	1010	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,3
Luftporen		200	230	225	220	175	175	170	185
Summe		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Verhältnis Ton/Schleifstaub [–]		2,25	1,43						
Blähglasgehalt [Vol. – %]		65,0	62,4	62,8	63,1	67,4	68,1	69,1	69,4

Tabelle A.4.: Zusammensetzung des entwickelten Warmbetons (Warmbeton D2) bei der Herstellung in der Suspensionsmischanlage bei nachlassendem Luftporengehalt

Material	Rohdichte [kg/m ³]	nach Mischende		1 h / 2 h nach Mischbeginn		3 h nach Mischbeginn	
		Stoffraum [dm ³ /m ³]	Masse [kg/m ³]	Stoffraum [dm ³ /m ³]	Masse [kg/m ³]	Stoffraum [dm ³ /m ³]	Masse [kg/m ³]
CEM III/A 42,5 N	3000	31,5	94,4	32,4	97,1	33,0	98,9
Gebranntes Tonmehl	2700	19,8	53,5	20,4	55,0	20,8	56,0
Silikastaub RW-Füller	2320	6,2	14,6	6,4	15,1	6,5	15,3
Blähglas 0,25/0,5	512	134,0	68,6	137,8	70,6	140,4	71,9
Blähglas 1/2	381	54,6	20,8	56,1	21,4	57,2	21,8
Blähglas 2/4	310	101,8	31,6	104,7	32,5	106,7	33,1
Blähglas 4/8	286	106,6	30,5	109,6	31,4	111,7	31,9
Blähglas 8/16	282	278,0	78,4	285,9	80,6	291,3	82,2
Wasser	1000	47,9	47,9	49,3	49,3	50,3	50,3
Fließmittel Sika G-2	1090	10,4	11,3	10,6	11,6	10,9	11,8
Luftporenbildner TM 89/29 E	1000	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5
Luftporen		193,0		170,1		154,1	
Compound LightPore (Stabilisierer, Beschleuniger, Hydrophobierungsmittel)	1010	14,2	14,3	14,6	14,7	14,9	15,0
Summe		1000		1000		1000	

A.2. Messwerte der Druckfestigkeit

Tabelle A.5.: Messwerte der Druckfestigkeit des Warmbetons und Umrechnung auf den Referenzprobekörper zur Berechnung der charakteristischen Festigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton nach DIN EN 1520 [12]

Messwert der Druckfestigkeit (gesondert hergestellter Probekörper) [N/mm ²]	Umrechnung auf Referenzbauteilprobekörper $f_{\text{Ref}} = 0,85 \cdot f_{\text{Messwert}}$ [N/mm ²]
5,13	4,36
5,09	4,33
5,14	4,37
4,72	4,01
5,17	4,39
5,11	4,34
5,14	4,37
4,81	4,09
5,48	4,66
5,21	4,43
5,42	4,61
5,15	4,38
5,47	4,65
5,17	4,39
4,86	4,13

Literaturverzeichnis

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB) (Hrsg.): *Klimaschutzplan 2050*. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf, 2016 – Zugriffsdatum: 23.05.2017
- [2] KANTONSBIBLIOTHEK GRAUBÜNDEN, AMT FÜR KULTUR (Hrsg.): *Haus Meuli*. http://www.baukultur.gr.ch/de_DE/address/haus_meuli_2001.24005, – Zugriffsdatum: 22.05.2017
- [3] BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG (BBSR) (Hrsg.): *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)*. http://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/EnEV/EnEV2013/Download/Lesefassung_EnEV2013.pdf?__blob=publicationFile&v=2, 2015 – Zugriffsdatum: 17.07.2017
- [4] ROBERZ, F.; LOONEN, R.C.G.M.; HOES, P.; HENSEN, J.L.M: Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass. In: *Energy and Buildings* 138 (2017), S. 432–442
- [5] SCHLAICH, M.; ZAREEF, M. E.: Infralichtbeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 103 (2008), Nr. 3, S. 175–182
- [6] FAUST, T.: *Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau*. Ernst und Sohn, 2003
- [7] GARTMANN, P.: *Das Potenzial von Dämmbeton*. Zürich, 2009 – 3. Schweizer Betonforum
- [8] LEIBINGER, R.; SCHLAICH, M.; LÖSCH, C.; RIESEBERG, P.; BALLESTREM, M.: *Infralichtbeton im Geschosswohnbau (INBIG)*. 2016 – Forschungsinitiative Zukunft Bau, Abschlussbericht
- [9] KLATT, A.: *Mineralisch ummantelte Holzspäne als Leichtzuschlag für Beton - Potentiale und Grenzen modifizierter organischer Materialien*, TU Darmstadt, Institut für Massivbau, Diss., 2012

- [10] HUISKES, D.M.A.; KEULEN, A.; YU, Q.L.; BROUWERS, H.J.H.: Design and performance evaluation of ultra-lightweight geopolymer concrete. In: *Materials and Design* 89 (2016), S. 516–526
- [11] GILKA-BÖTZOW, A.: *Stabilität von ultraleichten Schaumbetonen - Betrachtung instationärer Porenstrukturen*, TU Darmstadt, Diss., 2016
- [12] DIN EN 1520: Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton und mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung. Berlin: Beuth, 2011
- [13] DIN 4108-4: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. Berlin: Beuth, 2013
- [14] CALLSEN, B.; THIENEL, K.-Ch.: Besondere Aspekte bei der Entwicklung und Ausführung eines hochwärmedämmenden Hochleistungs-Leichtbetons mit sehr niedriger Betonrohddichte. In: *Beton* (2017), Nr. 4, S. 128–134
- [15] STENGEL, T.; LOWKE, D.; SCHIESSL, P.; GEHLEN, Chr.: UHPC mit alternativen Zusatzstoffen - Rheologie und Faserverbund. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr. 1, S. 31–38
- [16] LARRARD, F. de: *Concrete Mixture-Proportioning - A Scientific Approach*. E & FN SPON, 1999
- [17] HÜTTL, R.: *Der Wirkungsmechanismus von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff*, TU Berlin, Diss., 2000
- [18] LANGE, F.; MÖRTEL, H.; RUDERT, V.: Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. In: *Cement and Concrete Research* 27 (1997), S. 1481–1488
- [19] GEISENHANSLÜKE, C.: Modellierung und Berechnung hochdichter Feinstkornpackungen für Beton. In: *Tagungsband zur Veranstaltung 45. Forschungskolloquium des DAfStb vom 6.-7.10.2005 in Wien*. 2005, S. 65–68
- [20] ANDREASEN, A.H.M; ANDERSEN, J.: Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). In: *Kolloid-Zeitschrift* 50 (1930), Nr. 3, S. 217–228
- [21] HÜSKEN, G.; BROUWERS, H.J.H.: A new mix design concept for earth-moist concrete: A theoretical and experimental study. In: *Cement and Concrete Research* 61 (2015), S. 18–28

- [22] YU, Q.L.; SPIESZ, P.; BROUWERS, H.J.H: Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation. In: *Cement & Concrete Composites* 61 (2015), S. 18–28
- [23] MACHT, J.; NISCHER, P.: Mehlkornoptimierung - Notwendigkeit und Möglichkeiten zur Ermittlung der Korneigenschaften. In: *BFT* (2006), Nr. 4, S. 38–47
- [24] INSTITUT FRANÇAIS DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS, DE L'AMÉNAGEMENT ET DES RÉSEAUX (IFSTTAR) (Hrsg.): *BétonlabPro*. <http://betonlabpro.ifsttar.fr/>, – Zugriffsdatum: 11.04.2018
- [25] LARRARD, F. de; SEDRAN, T.: Le logiciel BétonlabPro 3. In: *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* n°270-271 (2007), S. 75–85
- [26] LECOMTE, A.; MECHLING, J.-M.; DILIBERTO, C.: Indice de serrage des pâtes de consistance normale. In: *Tagungsband zur Veranstaltung Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)²B*. Toulouse, 2006, S. 102–112
- [27] BAUMERT, C.: *Rheometrische Mischprozessführung. Intensiv-Konus-Mischer mit integriertem Rheometer zur Herstellung von Hochleistungsbeton mit definierten rheologischen Eigenschaften*, TU Darmstadt, Diss., 2012
- [28] JÉZÉQUEL, P.-H.; COLLIN, V.: Mixing of concrete or mortars: Dispersive aspects. In: *Cement and Concrete Research* 37 (2007), S. 1321–1333
- [29] MUELLER, M.: Feststoffmischen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 79 (2007), Nr. 7, S. 1015–1023
- [30] YARAGAL, S.C.; HIREMATH, P.N: Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of Reactive Powder Concrete. In: *Construction and Building Materials* 141 (2017), S. 271–288
- [31] BAUMERT, C.; GARRECHT, H.: Mischen von Hochleistungsbetonen. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 105 (2010), Nr. 6, S. 371–378
- [32] SCHULZE, J.; BREIT, W.: Experimentalgebäude aus Infraleichtbeton - monolithisch und hochwärmedämmend. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016), Nr. 6, S. 377–384
- [33] DIN EN 206-1: Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Berlin: Beuth, 2013

- [34] BACHER, R.: *Dreidimensionale, instationäre Effekte kavitierender Strömungen - Analyse an Einzelprofilen und in einer Radialpumpe*, TU Darmstadt, Diss., 2004
- [35] KÖHLER, K.: *Simultanes Emulgieren und Mischen*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2010
- [36] ROUSSEL, N.: A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. In: *Cement and Concrete Research* 36 (2006), S. 1797–1806
- [37] WALLEVIK, J.E.: Relationship between the Bingham parameters and slump. In: *Cement and Concrete Research* 36 (2006), S. 1214–1221
- [38] MARTIN, M.; SCHULZE, R.: *Grundlagen der Betonverdichtung*. 4. Auflage. SDV AG, 2008
- [39] FONTANA, P.: Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die frühen autogenen Verformungen der Bindemittelmatrix von Hochleistungsbeton. In: DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): *Schriftenreihe des DAfStb 570*. Berlin: Beuth Verlag, 2007
- [40] SCHÖLER, A.; LOTHENBACH, B.; WINNEFELD, F.; HAHN, M. B.; ZAJAC, M.; LUDWIG, H.-M.: Early hydration of SCM-blended Portland cements: A pore solution and isothermal calorimetry study. In: *Cement and Concrete Research* 93 (2017), S. 71–82
- [41] GE, Z.; WANG, K.; SANDBERG, P.J.; RUIZ, J.M.: Characterization and Performance Prediction of Cement-Based Materials Using a Simple Isothermal Calorimeter. In: *Journal of Advanced Concrete Technology* 7 (2017), Nr. 3, S. 355–366
- [42] BERGOLD, S.T.; GOETZ-NEUNHOEFFER, F.; NEUBAUER, J.: Interaction of silicate and aluminate reaction in a synthetic cement system: Implications for the process. In: *Cement and Concrete Research* 93 (2017), S. 32–44
- [43] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V. (Hrsg.): *Zement-Taschenbuch*. 51. Auflage. 2008
- [44] GRÜBL, P.; WEIGLER, H.; KARL, S.: *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften*. 2. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, 2001
- [45] WENDLING, A.; SADHASIVAM, K.; FLOYD, R.W.: Creep and shrinkage of lightweight self-consolidating concrete for prestressed members. In: *Construction and Building Materials* 167 (2018), S. 205–215
- [46] REINHARDT, H.-W.: *Ingenieurbaustoffe*. 2. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, 2010

- [47] STARK, J.; WICHT, B.: *Zement und Kalk: der Baustoff als Werkstoff; mit 90 Tabellen*. Basel: Birkhäuser, 2000
- [48] JUHART, J.: *Adhäsion von UHPC an Stahl und Glas. Ein Beitrag zu Adhäsion und Haftfestigkeit von Hochleistungs- und Ultra-Hochleistungs-Feinkornbeton an Stahl und Glas unterschiedlicher Rauheit*, TU Graz, Diss., 2011
- [49] SETZER, M.J.: Einfluss des Wassergehalts auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. In: DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): *DAfStb Heft 280*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn KG, 1977
- [50] TAMTSIA, B.T.; BEAUDOIN, J.J.: Basic creep of hardened cement paste: A re-examination of the role of water. In: *Cement and Concrete Research* 30 (2000), S. 1465–1475
- [51] TARTSCH, E.: *Bewertung der Dauerstandfestigkeit von dampfgehärtetem Porenbeton auf der Grundlage von Kurzzeitversuchen*, Bauhaus-Universität Weimar, Diss., 2008
- [52] WITTMANN, F.H.: Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons. In: DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): *DAfStb Heft 290*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 1977
- [53] TAYLOR, H.F.W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K.L.: Review: Delayed ettringite formation. In: *Cement and Concrete Research* 31 (2001), S. 683–693
- [54] NGUYEN, V.-H.; LEKLOU, N.; AUBERT, J.-E.; MOUNANGA, P.: The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation. In: *Construction and Building Materials* 48 (2013), S. 479–484
- [55] AMINE, Y.; LEKLOU, N.; AMIRI, O.: Effect of supplementary cementitious materials (scm) on delayed ettringite formation in heat-cured concretes. In: *Energy Procedia* 139 (2017), S. 565–570
- [56] SHAMAA, M.A.; LAVAUD, S.; DIVET, L.; COLLIAT, J.B.; NAHAS, G.; TORRENTI, J.M.: Influence of limestone filler and of the size of the aggregates on DEF. In: *Cement & Concrete Composites* 71 (2016), S. 175–180
- [57] AİTCİN, P.-C.: *Binders for durable and sustainable concrete*. Taylor & Francis, 2008
- [58] BENEDIX, R.: *Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015

- [59] WEERDT, K. D.; HAHN, M.B.; SAOUT, G. L.; KJELLEN, K.O.; JUSTNES, H.; LOTHTENBACH, B.: The effect of temperature on the hydration of composite cements containing limestone powder and fly ash. In: *Materials and Structures* 45 (2012), S. 1101–1114
- [60] SCHULER, J.: *Einfluss der Temperatur auf die Phasenbildung während der Zementhydratation*. 2014 – Bachelorarbeit, IWB Universität Stuttgart
- [61] LOCHER, F.W.: *Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2000 – ISBN 3–7640–0400–2
- [62] SING, K.S.W.; EVERETT, D.H.; HAUL, R.A.W.; MOSCOU, L.; PIEROTTI, R.A.; ROUQUÉROL, J.; SIEMIENIEWSKA, T.: Reporting Physisorption Data for Gas/Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface Area and Porosity. In: *Pure & Applied Chemistry* 57 (1985), S. 603–619
- [63] ORTMANN, R.: *Untersuchungen zur Adsorption und Desorption von Aldehyden und Aminen im Spurenbereich*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2016
- [64] DIN EN ISO 12571: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften. Berlin: Beuth, 2013
- [65] ALDERETE, N.; VILLAGRÁN, Y.; MIGNON, A.; SNOECK, D.; BELIE, N. D.: Pore structure description of mortars containing ground granulated blast-furnace slag by mercury intrusion porosimetry and dynamic vapour sorption. In: *Construction and Building Materials* 145 (2017), S. 157–165
- [66] PANESAR, D.K.; FRANCIS, J.: Influence of limestone and slag on the pore structure of cement paste based on mercury intrusion porosimetry and water vapour sorption measurements. In: *Construction and Building Materials* 52 (2014), S. 52–58
- [67] ZENG, Q.; ZHANG, D.; SUN, H.; LI, K.: Characterizing pore structure of cement blend pastes using water vapor sorption analysis. In: *Materials Characterization* 95 (2014), S. 72–84
- [68] HORIKAWA, T.; DO, D.D.; NICHOLSON, D.: Capillary condensation of adsorbates in porous materials. In: *Advances in Colloid and Interface Science* 169 (2011), S. 40–58
- [69] FISCHER, H.-M.; JENISCH, R.; STOHRER, M.; HOMANN, M.; FREYMUTH, H.; RICHTER, E.; HÄUPL, P.: *Lehrbuch der Bauphysik Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima*. 6. Auflage. Vieweg+Teubner, 2008

- [70] BARSOTTI, E.; TAN, S.P.; PIRI, S. S. d.; CHEN, J.-H.: A review on capillary condensation in nanoporous media: Implications for hydrocarbon recovery from tight reservoirs. In: *Fuel* 184 (2016), S. 344–361
- [71] HECK, F.: *Energiekosten senken: Kosten und Nutzen von Wärmedämmmaßnahmen*. Fraunhofer IRB Verlag, 2007
- [72] VOLLAND, K.; VOLLAND, J.: *Wärmeschutz und Energiebedarf nach EnEV 2014: Schritt für Schritt zum Energieausweis für Wohngebäude im Neubau und Bestand*. 4. Auflage. Müller, 2014
- [73] NGUYEN, L.H.; BEAUCOUR, A.-L.; ORTOLA, S.; NOUMOWÉ, A.: Experimental study on the thermal properties of lightweight aggregate concretes at different moisture contents and ambient temperatures. In: *Construction and Building Materials* 151 (2017), S. 720–731
- [74] SCHILD, K.; WILLEMS, W. M.: *Wärmeschutz: Grundlagen - Berechnung - Bewertung*. 2. Auflage. Springer Vieweg, 2013
- [75] ARONI, S. (Hrsg.): *Autoclaved aerated concrete: properties, testing and design; RILEM recommended practice*. London: E FN Spon, 1993
- [76] DIN EN ISO 10456: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte. Berlin: Beuth, 2010
- [77] STARK, J.; WICHT, B.: *Dauerhaftigkeit von Beton: der Baustoff als Werkstoff*. Birkhäuser Verlag, 2001
- [78] DUCMAN, V.; MLADENVIČ, A.; ŠUPUT, J.S.: Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity. In: *Cement and Concrete Research* 32 (2002), S. 223–226
- [79] MLADENVIČ, A.; ŠUPUT, J.S.; DUCMAN, V.; ŠKAPIN, A.S.: Alkali-silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates. In: *Cement and Concrete Research* 34 (2004), S. 1809–1816
- [80] BUMANIS, G.; BAJARE, D.; LOCS, J.; KORJAKINS, A.: Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete. In: *Construction and Building Materials* 47 (2013), S. 274–281
- [81] Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). In: DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): *DAfStb-Richtlinie*. Berlin: Beuth Verlag, 2013

- [82] WEBER, S.; BRUY, E.; SCHÄFFLER, H.: *Baustoffkunde mit aktuellen Normen*. 11. Auflage. Vogel Business Media, 2017
- [83] WILLEMS, W. M.; SCHILD, K.; DINTER, S.: *Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 1: Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung*. Vieweg, 2006
- [84] VALORE, R.C.: Insulating Concretes. In: *Journal of American Concrete Institute* 28 (1956), S. 509–532
- [85] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Berlin: Beuth, 2009
- [86] EYERER, P.; REINHARDT, H.-W.: *Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden: Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung*. Basel: Birkhäuser, 2000
- [87] KLÖPFFER, W.; GRAHL, B.: *Ökobilanz (LCA): ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009
- [88] THIENEL, K.-Ch.; PECK, M.: Leichtbetone für die moderne Architektur. In: *Baukultur* 5 (2007), S. 33–35
- [89] DIN EN 1992 Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Berlin: Beuth, 2011
- [90] THIENEL, K.-Ch.: Fertigteilelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit porosierter Matrix. In: *Betonwerk + Fertigteiltechnik* 60 (2000), S. 62 – 72
- [91] YU, R.; ONNA, D.V. van; SPIESZ, P.; YU, Q.L.; BROUWERS, H.J.H: Development of Ultra-Lightweight Fibre Reinforced Concrete applying expanded waste glass. In: *Journal of Cleaner Production* 112 (2016), S. 690–701
- [92] NGUYEN, L.H.; BEAUCOUR, A.-L.; ORTOLA, S.; NOUMOWÉ, A.: Influence of the volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete. In: *Construction and Building Materials* 51 (2014), S. 121–132
- [93] BRANCO, F.G.; GODINHO, L.: On the use of lightweight mortars for the minimization of impact sound transmission. In: *Construction and Building Materials* 45 (2013), S. 184–191
- [94] MO, K.H.; LING, T.-C.; ALENGARAM, U.J.; YAP, S.P.; YUEN, C.W.: Overview of supplementary cementitious materials usage in lightweight aggregate concrete. In: *Construction and Building Materials* 139 (2017), S. 403–418

- [95] DUCMAN, V.; MIRTIC, B.: Water vapour permeability of lightweight concrete prepared with different type of lightweight aggregates. In: *Construction and Building Materials* 68 (2014), S. 314–319
- [96] ATMACA, N.; ABBAS, M.L.; ATMACA, A.: Effects of nano-silica on the gas permeability, durability and mechanical properties of high-strength lightweight concrete. In: *Construction and Building Materials* 147 (2017), S. 17–26
- [97] KIM, H.K.; JEON, J.H.; LEE, H.K.: Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air. In: *Construction and Building Materials* 29 (2012), S. 193–200
- [98] PAPA, E.; MEDRI, V.; KPOGBEMABOU, D.; MORINIÈRE, V.; LAUMONIER, J.; VACCARI, A.; ROSSIGNOL, S.: Porosity and insulating properties of silica-fume based foams. In: *Energy and Buildings* 131 (2016), S. 223–232
- [99] KIM, H.K.; LEE, H.K.: Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. In: *Applied Acoustics* 71 (2010), S. 607–615
- [100] WILLEMS, W. M.; SCHILD, K.; STRICKER, D.: *Schallschutz: Bauakustik, Grundlagen - Luftschallschutz - Trittschallschutz*. Springer Vieweg, 2012
- [101] NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K.: Structure and properties of aerated concrete: a review. In: *Cement & Concrete Composites* 22 (2000), S. 321–329
- [102] AMRAN, Y.H.M.; FARZADNIA, N.; ALI, A.A.A.: Properties and applications of foamed concrete; a review. In: *Construction and Building Materials* 101 (2015), S. 990–1005
- [103] LI, Y.; LI, Z.; HAN, F.: Air flow resistance and sound absorption behavior of open-celled aluminium foams with spherical cells. In: *Procedia Materials Science* 4 (2014), S. 187–190 – 8th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams, Metfoam 2013
- [104] MÜLLER, H.S.; HAIST, M.: Rissursachen und betontechnologische Möglichkeiten der Rissbeherrschung. In: MÜLLER, H.S. (Hrsg.); NOLTING, U. (Hrsg.); HAIST, M. (Hrsg.): *Beherrschung von Rissen in Beton*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2010
- [105] YOUM, K.-S.; MOON, J.; CHO, J.-Y.; KIM, J.J.: Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume. In: *Construction and Building Materials* 114 (2016), S. 517–527

- [106] LUTZE, D.; BERG, W. vom: *Handbuch Flugasche im Beton*. Verlag Bau und Technik, 2004
- [107] AİTCIN, P.-C.: Supplementary cementitious materials and blended cements. In: AİTCIN, P.-C. (Hrsg.); FLATT, R.J. (Hrsg.): *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing, 2016
- [108] AL-SIBAHY, A.; EDWARDS, R.: Mechanical and thermal properties of novel lightweight concrete mixtures containing recycled glass and metakaolin. In: *Construction and Building Materials* 31 (2012), S. 157–167
- [109] UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *Gebäudeklimatisierung*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/fluorierete-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/gebaeudeklimatisierung>, – Zugriffsdatum: 12.06.2018
- [110] SCHLIESSER, A.; BAUMERT, C.; GARRECHT, H.; TENWINKEL, M.: Entwicklung eines hochfesten Schwerbetons. In: *BetonWerk International* (2014), Nr. 5, S. 16–20
- [111] GAGNÉ, R.: Air entraining agents. In: AİTCIN, P.-C. (Hrsg.); FLATT, R.J. (Hrsg.): *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing, 2016
- [112] POTT, J.U.: *Entwicklungsstrategien für zementgebundene Schäume*, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Diss., 2006
- [113] AİTCIN, P.-C.: Entrained air in concrete: rheology and freezing resistance. In: AİTCIN, P.-C. (Hrsg.); FLATT, R.J. (Hrsg.): *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing, 2016
- [114] RATH, S.; OUCHI, M.; PUTHIPAD, N.; ATTACHAIYAWUTH, A.: Improving the stability of entrained air in self-compacting concrete by optimizing the mix viscosity and air entraining agent dosage. In: *Construction and Building Materials* 148 (2017), S. 531–537
- [115] HUANG, F.; LI, H.; YI, Z.; WANG, Z.; XIE, Y.: The rheological properties of self-compacting concrete containing superplasticizer and air-entraining agent. In: *Construction and Building Materials* 166 (2018), S. 833–838
- [116] OLIVEIRA ROMANO, R.C. de; REIS TORRES, D. dos; PILEGGI, R.G.: Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars. In: *Construction and Building Materials* 82 (2015), S. 219–226

- [117] PANESAR, D.K.: Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. In: *Construction and Building Materials* 44 (2013), S. 575–584
- [118] BAUMERT, C.; GARRECHT, H.: *Mineralschaum 2.0 - Herstellungsverfahren und Bindemittel für schwindarme und schnell erhärtende Systeme*. Neu-Ulm, 2016 – Praxis-Workshop 60. Betontage
- [119] NOWAK-MICHTA, A.: Influence of superplasticizer on porosity structures in hardened concretes. In: *Procedia Engineering* 108 (2015), S. 262–269
- [120] AİTCIN, P.-C.: Accelerators. In: AİTCIN, P.-C. (Hrsg.); FLATT, R.J. (Hrsg.): *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing, 2016
- [121] PALACIOS, M.; FLATT, R.J.: Working mechanism of viscosity-modifying admixtures. In: AİTCIN, P.-C. (Hrsg.); FLATT, R.J. (Hrsg.): *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing, 2016
- [122] LEEMANN, A.; WINNEFELD, F.: The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete. In: *Cement & Concrete Composites* 29 (2007), S. 341–349
- [123] MARCHON, D.; FLATT, R.J.: Impact of chemical admixtures on cement hydration. In: AİTCIN, P.-C. (Hrsg.); FLATT, R.J. (Hrsg.): *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing, 2016
- [124] FELEKOĞLU, B.; TOSUN, K.; BARADAN, B.: Compatibility of a polycarboxylate-based superplasticiser with different set-controlling admixtures. In: *Construction and Building Materials* 25 (2011), S. 1466–1473
- [125] DIN EN 13055: Leichte Gesteinskörnungen. Berlin: Beuth, 2016
- [126] DIN 1045: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Berlin: Beuth, 2008
- [127] OKTAY, H.; YUMRUTAŞ, R.; AKPOLAT, A.: Mechanical and thermophysical properties of lightweight aggregate concretes. In: *Construction and Building Materials* 96 (2015), S. 217–225
- [128] AYATI, B.; FERRÁNDIZ-MAS, V.; NEWPORT, D.; CHEESEMAN, C.: Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate. In: *Construction and Building Materials* 162 (2018), S. 124–131

- [129] LIAVER GMBH & CO KG (Hrsg.): *Produktdatenblatt Blähglas*. http://www.liaver.com/fileadmin/user_upload/pdf/Technisches_Datenblatt_2-4mm_2014.pdf, – Zugriffsdatum: 27.06.2017
- [130] GRUEBL, P.: *Ein Modell zur quantitativen Beschreibung der Bruchvorgänge in gefügedichtem Leichtbeton bei kurzzeitiger Druckbeanspruchung*, TU München, Diss., 1977
- [131] SELL, R.: Die Kornfestigkeit künstlicher Zuschlagstoffe und ihr Einfluß auf die Betonfestigkeit. In: DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): *DAfStb Heft 280*. Berlin: Beuth Verlag, 1974
- [132] NEPOMUCENO, M.C.S; OLIVEIRA, L.A. P.; PEREIRA, S.F.: Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates. In: *Construction and Building Materials* 166 (2018), S. 373–385
- [133] SHAFIGH, P.; CHAI, L.J.; MAHMUD, H.B.; NOMELI, M.A.: A comparison study of the fresh and hardened properties of normal weight and lightweight aggregate concrete. In: *Journal of Building Engineering* 15 (2018), S. 252–260
- [134] WEBER, I.: *Entwicklung gefügedichteter Holzleichtbetone unter ökologischen, rheologischen und wirtschaftlichen Aspekten*. 2013 – Bachelorarbeit, IWB Universität Stuttgart
- [135] GARRECHT, H.; AICHER, S.; ZISI, N.; SCHLIESSER, A.: Gefügedichter Holz-Leichtbeton - Leistungspotenzial, Chancen, Herausforderungen. In: AICHER, S. (Hrsg.): *3. Stuttgarter Holzbau-Symposium*. Stuttgart: Materialprüfungsanstalt, 2015
- [136] FERRARA, L.; CAVERZAN, A.; PELED, A.: “Collapsible” lightweight aggregate concrete. Part I: material concept and preliminary characterization under static loadings. In: *Materials and Structures* 49 (2016), S. 1733–1745
- [137] ZAETANG, Y.; WONGSA, A.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P.: Use of lightweight aggregates in pervious concrete. In: *Construction and Building Materials* 48 (2013), S. 585–591
- [138] THIENEL, K.-Ch.: *Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1*. 2005 – Gutachten im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin

- [139] GOLTERMANN, P.; LARSEN, H.; INGHOLT, N.U.: Strength and Stiffness Relations in Lightweight Aggregate Concrete with open Structure. In: *Nordic Concrete Research* 15 (1994), S. 35 – 45
- [140] GOLTERMANN, P.: Prefabricated Floor Slabs in Roller-Compacted Lightweight Aggregate Concrete. In: HELLAND, S. (Hrsg.); HOLAND, I. (Hrsg.); SMEPLASS, S. (Hrsg.): *Proceedings - Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Kristiansand, Norwegen, 2000
- [141] Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Berlin: Beuth, 2011
- [142] VOGDT, F.U.; HELBACH, M.: Eine thermisch aktiv gedämmte, monolithische Außenwand aus Infralichtbeton als nachhaltiges, zukunftsfähiges Wandsystem? In: *Bauphysik* 37 (2015), S. 38–51
- [143] GAO, T.; JELLE, B.P.; GUSTAVSEN, A.; JACOBSEN, S.: Aerogel-Incorporated Concrete: An Experimental Study. In: *Construction and Building Materials* 52 (2014), S. 130–136
- [144] Technische Regeln für vorgefertigte bewehrte tragende Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton. Berlin: DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik), 2004
- [145] CEMENT&BETONCENTRUM (Hrsg.): *Proefwand Warmbeton gestort*. <http://www.cementenbeton.nl/materiaal/warmbeton/proefwand-warmbeton>, 2015 – Zugriffsdatum: 25.05.2017
- [146] HUB, A.; ZIMMERMANN, G.; KNIPPERS, J.: Leichtbeton mit Aerogelen als Konstruktionswerkstoff. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), Nr. 9, S. 654–661
- [147] SCHNELLENBACH-HELD, M.; WELSCH, T.; FICKLER, S.; MILOW, B.; RATKE, L.: Entwicklung von Hochleistungsaerogelbeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016), Nr. 9, S. 555–563
- [148] HÜSING, N.; SCHUBERT, U.: Aerogele - luftige Materialien: Chemie, Struktur und Eigenschaften. In: *Angewandte Chemie* 110 (1998), Nr. 1-2, S. 22–47
- [149] MO, K.H.; ALENGARAM, U.J.; JUMAAT, M.Z.: Bond properties of lightweight concrete - A review. In: *Construction and Building Materials* 112 (2016), S. 478–496
- [150] HÜCKLER, A.: *Trag- und Verformungsverhalten von biegebeanspruchten Bauteilen aus Infralichtbeton (ILC)*. Göttingen, TU Berlin, Diss., 2016

- [151] RC 6 Bond Test for Reinforcement Steel. 2. Pull-out Test, 1983. In: RILEM (Hrsg.): *RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials*. E & FN SPON, 1994
- [152] HORIZON 2020 WORK PROGRAMME (Hrsg.): *EC, Technology Readiness Levels - Appendix G*. https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf, 2014 – Zugriffsdatum: 08.06.2017
- [153] DIN CEN/TR 16632: Bestimmung der Hydratationswärme von Zement durch isotherme Wärmeflusskalorimetrie: Stand der Technik und Empfehlungen. Berlin: Beuth, 2014
- [154] DIN EN 12350-7: Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren. Berlin: Beuth, 2009
- [155] DIN EN 12390-3: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Berlin: Beuth, 2009
- [156] DIN EN 12390-13: Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul). Berlin: Beuth, 2014
- [157] Prüfung von Beton - Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. In: DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): *DAfStb Heft 422*. Berlin: Beuth, 1991
- [158] DIN 66133: Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion. Berlin: Beuth, 1993
- [159] DIN EN 993-15: Prüfverfahren für dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse - Teil 15: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Heißdraht-(Parallel-) Verfahren. Berlin: Beuth, 2005
- [160] DIN EN 12664: Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand. Berlin: Beuth, 2001
- [161] DIN EN 12390-9: Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung. Berlin: Beuth, 2006
- [162] DIN EN ISO 15148: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen. Berlin: Beuth, 2016

- [163] DIN EN 1354: Bestimmung der Druckfestigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton. Berlin: Beuth, 2005
- [164] SCHÖCK BAUTEILE GMBH (Hrsg.): *Technische Information Schöck Combar®*. <https://www.schoeck.de/de/downloads/eyJjYXRlZ29yeSI6eyI3Ijo3fX0>, – Zugriffsdatum: 05.05.2019
- [165] ŠAVIJA, B.; LUCKOVIĆ, M.: Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. In: *Construction and Building Materials* 117 (2016), S. 285–301
- [166] SHAH, V.; SCRIVENER, K.; BHATTACHARJEE, B.; BISHNOI, S.: Changes in microstructure characteristics of cement paste on carbonation. In: *Cement and Concrete Research* 109 (2018), S. 184–197
- [167] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (Hrsg.): *fib Model Code for Concrete Structures*. Berlin: Ernst & Sohn, 2013
- [168] WAGNER, O.: Das Kriechen unbewehrten Betons. In: DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): *DAfStb Heft 131*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 1958
- [169] LINSEIS MESSGERÄTE GMBH: *Handbuch Transient Hot Bridge - THB 100*, 2015
- [170] RUUSKA, T.; VINHA, J.; KIVIOJA, H.: Measuring thermal conductivity and specific heat capacity values of inhomogeneous materials with a heat flow meter apparatus. In: *Journal of Building Engineering* 9 (2017), S. 135–141
- [171] BAUER, A.: *Temperatureinfluss auf die Herstellung von Warmbeton*. 2017 – Bachelorarbeit, IWB Universität Stuttgart
- [172] SCHMID, J.: *Ökobilanzierung von Leichtbeton*. 2016 – Bachelorarbeit, IWB Universität Stuttgart
- [173] LIAVER GMBH & CO KG (Hrsg.): *Produktdatenblatt Reapor*. http://www.liaver.com/fileadmin/user_upload/pdf/TechDatblatt__Reapor_2014.pdf, – Zugriffsdatum: 27.06.2017
- [174] BOTTKER, R.: *Hydro 5 - Prognose der 28-Tagesfestigkeit mit Hilfe der Frischbetonrohddichte und -porosität*. Neu-Ulm, 2015 – Praxis-Workshop 59. Betontage
- [175] GEGGEL, A.: *Frischbetonprüfung mit dem Hydro 5: Korrekturfaktor für Gesteinskörnung*. 2015 – Bachelorarbeit, IWB Universität Stuttgart

- [176] DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme. Berlin: Beuth, 2010
- [177] LÉDÉE, V.; LARRARD, F. de; SEDRAN, T.; BROCHU, F.: *Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses*, 2004 – Méthode d'essai n°61
- [178] DIN EN 196-3: Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. Berlin: Beuth, 2009
- [179] WALLEVIK, O.H.; WALLEVIK, J.E.: Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. In: *Cement and Concrete Research* 41 (2011), S. 1279–1288
- [180] NIE, S.; HU, S.; WANG, F.; HU, C.; LI, X.; ZHU, Y.: Pozzolanic reaction of lightweight fine aggregate and its influence on the hydration of cement. In: *Construction and Building Materials* 153 (2017), S. 165–173
- [181] JEONG, J.; RAMÉZANI, H.; LEKLOU, N.; MOUNANGA, P.: Chemo-physical modeling of cement mortar hydration: Role of aggregates. In: *Thermochimica Acta* 564 (2013), S. 70–82
- [182] RÖHLING, S.: *Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme*. 2. Auflage. Verlag Bau + Technik, 2009
- [183] LIAVER GMBH & Co KG (Hrsg.): *Sicherheitsdatenblatt Blähglas*. http://www.liaver.com/fileadmin/user_upload/pdf/REACH-Sicherheitsdatenblatt_Liaver_2013.pdf, – Zugriffsdatum: 03.04.2018
- [184] DIN EN 1352: Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls unter Druckbeanspruchung von dampfgehärtetem Porenbeton und von haufwerksporigem Leichtbeton. Berlin: Beuth, 1997
- [185] DIN EN 12390-7: Prüfung von Festbeton - Teil 7: Dichte von Festbeton. Berlin: Beuth, 2009
- [186] LÖSCH, C.; RIESEBERG, P.; SCHLAICH, M. (Hrsg.); LEIBINGER, R. (Hrsg.): *Infraleichtbeton: Entwurf, Konstruktion, Bau*. Fraunhofer IRB Verlag, 2018
- [187] SCHNELL, J.: Statisch und dynamisch bedingte Risse. In: MÜLLER, H.S. (Hrsg.); NOLTING, U. (Hrsg.); HAIST, M. (Hrsg.): *Beherrschung von Rissen in Beton*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2010

- [188] *Wetterstation Schnarrenberg/Stuttgart, relative Feuchte.* https://www.wetteronline.de/wetterdaten/stuttgart?pcid=pc_rueckblick_data&gid=10738&pid=p_rueckblick_diagram&sid=StationHistory&iid=10739&metparaid=RHLD&period=52&month=12&year=2016, – Zugriffsdatum: 12.11.2017
- [189] ZHANG, M.; QIN, M.; RODE, C.; CHEN, Z.: Moisture buffering phenomenon and its impact on building energy consumption. In: *Applied Thermal Engineering* 124 (2017), S. 337–345
- [190] BUDUR, P.: *Verbesserung der Verbundeigenschaften von mineralisch ummantelten Holzspänen.* 2015 – Bachelorarbeit, IWB Universität Stuttgart
- [191] CEMWOOD GMBH (Hrsg.): *Produktdatenblatt CEMWOOD Schüttung.* <http://www.cemwood.de/wp-content/uploads/2013/11/datenblatt-cemwood-schuetting.pdf>, – Zugriffsdatum: 03.08.2017
- [192] DYCKERHOFF GMBH (Hrsg.): *Dyckerhoff NANODUR Compound 5941 zur einfachen Herstellung von UHPC.* <http://www.dyckerhoff.com/online/download.jsp?idDocument=372&instance=1>, – Zugriffsdatum: 05.12.2017
- [193] ZHANG, Y.: *Schnelltest zur Bewertung der Dauerhaftigkeit von Holzbeton.* 2016 – Masterarbeit, IWB Universität Stuttgart
- [194] DIN EN 12602: Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton. Berlin: Beuth, 2016