

**Zum Einfluss von bauteilintegrierten
Latentwärmespeichern auf das sommerliche
thermische Verhalten von Innenräumen
in Deutschland**

Vom Fachbereich Architektur
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Bastian Ziegler
geboren in Traben-Trarbach

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten U. Tichelmann
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Anton Maas

Tag der Einreichung: 28.08.2015
Tag der mündlichen Prüfung: 08.12.2015

Hochschulkenziffer D17
Aachen 2016

Berichte aus dem Bauwesen

Bastian Ziegler

**Zum Einfluss von bauteilintegrierten Latent-
wärmespeichern auf das sommerliche thermische
Verhalten von Innenräumen in Deutschland**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2015

© Titelbild Umschlag: astragal / Fotolia

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4851-3

ISSN 0945-067X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Tragwerksentwicklung und Bauphysik der Technischen Universität Darmstadt und im Anschluss daran parallel zu meiner hauptberuflichen Tätigkeit als Tragwerksplaner. Motivation für die Auseinandersetzung mit dem Themengebiet der Latentwärmespeicher war die Neugierde an innovativen Technologien und der persönliche Wunsch, einen Beitrag zur Entwicklung von nachhaltigen Konzepten für die Gebäudeklimatisierung zu leisten.

Ich danke Herrn Professor Karsten Tichelmann für das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheit bei der Themenfindung und Bearbeitung sowie Herrn Professor Anton Maas für die kurzfristige Übernahme des Koreferats. Besonderer Dank und Anerkennung gilt Herrn Professor Hauser, der seine wissenschaftliche Tätigkeit, auch im Rahmen des Koreferats dieser Arbeit, trotz schwerer Krankheit nicht aufgegeben hat.

Für die Förderung des Projekts „Potentiale und Chancen der Stahl(Leicht)bauweise“, in dessen Rahmen die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit durchgeführt wurden, gilt mein Dank der „Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.“ und der „Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen ‘Otto von Guericke‘ e.V.“.

Mein weiterer Dank gilt allen Kollegen und Freunden, die mich durch konstruktive Gespräche und anerkennende Worte unterstützt haben.

Besonders hervorzuheben ist der Rückhalt, den ich in einer arbeitsintensiven Zeit von meiner Frau und meinen Kindern erhalten habe. Er war von unschätzbarem Wert und hat mich stets von neuem motiviert und angetrieben. Hierfür möchte ich meine besondere Dankbarkeit aussprechen.

Ich erhoffe mir, mit dieser Arbeit die Neugierde aller Leser für die Technologie der latenten Wärmespeicherung zu wecken. Sie soll eine Wissensgrundlage für die effiziente Anwendung von Latentwärmespeichern bei der passiven Raumkühlung darstellen und zugleich Inspiration für eigene Ideen und Erkenntnisse sein. Ich wünsche allen Lesern eine interessante Lektüre.

Jork, Oktober 2016

Bastian Ziegler

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Fragestellung	2
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	3
1.3	Stand der Wissenschaft	4
2	Normative und gesetzliche Anforderungen an das Raumklima	15
2.1	Technische Regeln für Arbeitsstätten - ASR A3.5 - Raumtemperatur	17
2.2	DIN EN ISO 7730:2006-05 - Ergonomie der thermischen Umgebung	18
2.3	DIN EN 15251:2012-12 - Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden	21
2.3.1	DIN EN 15251:2012-12 - Anhang A.1	23
2.3.2	DIN EN 15251:2012-12 - Anhang A.2	23
2.3.3	DIN EN 15251:2012-12 - Nationaler Anhang	25
2.4	DIN 4108-2:2013-02 - Mindestanforderungen an den Wärmeschutz	27
2.4.1	Sonneneintragskennwertverfahren	28
2.4.2	Dynamische Gebäudesimulation	29
2.4.3	Anmerkungen zum Nachweisverfahren	29
2.5	Gegenüberstellung der Anforderungsniveaus	32
2.6	Anwendung der Richtlinien auf Gebäude ohne Kühlung	34
3	Die Bestandteile der Energiebilanz von Innenräumen im Sommer	39
3.1	Interne Wärmegewinne	40
3.2	Solare Wärmegewinne	41
3.3	Transmissionswärmeverlust	42
3.4	Lüftung und Nachtauskühlung	46
3.5	Wärmespeicherung	50
3.5.1	Effektivität gleichmäßig im Raum angeordneter Speichermasse	51
3.5.2	Effektivität punktuell im Raum angeordneter Speichermasse	56
3.6	Zusammenfassende Erläuterungen zur Energiebilanz von Innenräumen	62
4	Eigenschaften von Latentwärmespeichern	65
4.1	Anwendungsgebiete in Gebäuden	66
4.2	Paraffine	68
4.3	Salzhydrate	70
5	Experimentelle Untersuchung von bauteilintegrierten Latentwärmespeichern	73
5.1	Materialeigenschaften	73
5.2	Aufbau des Probekörpers	73
5.3	Versuchsordnung	75
5.4	Versuchsdurchführung und Messergebnisse	77
5.5	Ermittlung der Materialeigenschaften auf Grundlage der Messergebnisse	82

6	Numerisches Modell zur thermischen Simulation	87
6.1	Modell und Gleichungen	88
6.2	Funktionalitätsprüfung mittels Vergleichsrechnungen	91
6.3	Validierung des Rechenmodells	94
6.3.1	Randbedingungen der numerischen Validierungsrechnungen	94
6.3.2	Schmelz- und Erstarrungsvorgänge bei einer Temperaturänderungsge- schwindigkeit von 1,2 K/h	96
6.3.3	Schmelz- und Erstarrungsvorgänge bei einer mittleren Temperaturände- rungsgeschwindigkeit von ca. 2,5 K/h	97
6.3.4	Einfluss der Hysterese bei unvollständigen Phasenwechseln	100
7	Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit eines Latentwärmespeichers beim sommerlichen Wärmeschutz	105
7.1	Standardrandbedingungen der numerischen Berechnungen	107
7.1.1	Numerische Randbedingungen	107
7.1.2	Geometrie des Musterraums	107
7.1.3	Klimabedingungen	107
7.1.4	Nutzungsrandbedingungen	108
7.1.5	Wärmeübergangskoeffizienten	110
7.1.6	Materialeigenschaften	113
7.2	Einfluss der Materialeigenschaften und der Flächenbelegung	115
7.2.1	Schmelztemperatur, Schichtdicke und Fläche	116
7.2.2	Spezifische Schmelzenthalpie	123
7.2.3	Wärmeleitfähigkeit	124
7.2.4	Breite des Schmelzbereichs	126
7.2.5	Hysterese	128
7.3	Einfluss der Nutzungsrandbedingungen	130
7.3.1	Nachtluftwechsel	130
7.3.2	Konvektiver Wärmeübergang	135
7.3.3	Orientierung	137
7.3.4	Klimaregion	138
7.3.5	Nutzung	140
8	Berücksichtigung von Latentwärmespeichern bei der Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes	143
8.1	Die optimale Schmelztemperatur	143
8.2	Äquivalente, sensible, spezifische Wärmekapazität	146
8.2.1	Einfluss von Schichtdicke und Fläche	152
8.2.2	Einfluss der Materialeigenschaften	153
8.2.3	Einfluss der Nutzungsrandbedingungen	161
9	Zusammenfassung	169

A	Wissenschaftlicher Werdegang	177
B	Anhang zu Kapitel 2	179
	B.1 Einfluss der Orientierung auf das thermische Verhalten eines Musterraums . . .	179
C	Anhang zu Kapitel 3	190
	C.1 Solarenergieeintrag innerhalb eines Tages für verschiedene Grenzbestrahlungs- stärken und Verschattungsfaktoren	190
	C.2 Transmissionswärmeverluste des kubischen Musterraums	191
	C.3 Lüftungswärmeverluste des kubischen Musterraums	193
	C.4 Energiebilanz des Raumes und der Oberflächen im kubischen Musterraum . . .	207
D	Anhang zu Kapitel 5	219
	D.1 Messtechnische Geräte	219
	D.2 Versuchsergebnisse	220
E	Anhang zu Kapitel 6	235
	E.1 Numerischer Berechnungsalgorithmus zur Abbildung von latenterm Wärmespeicherverhalten	235
F	Anhang zu Kapitel 7	239
	F.1 Grundlegende Randbedingungen der numerischen Raumsimulation	239
	F.2 Grundlagen zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs an Innenoberflächen	245
	F.3 Grundlagen zur Berechnung des radiativen Wärmeübergangs an Innenoberflächen	247
	F.4 Grafische Darstellungen zum Einfluss der Schmelztemperatur und der PCM- haltigen Flächen auf die Wirksamkeit von latenter Speichermasse im Musterraum	248
	F.5 Grafische Darstellungen zum Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Wirksamkeit von latenter Speichermasse im Musterraum	262
	F.6 Grafische Darstellungen zum Einfluss der Nachtluftwechselrate auf die Wirk- samkeit von latenter Speichermasse im Musterraum	263
	F.7 Grafische Darstellungen zum Einfluss des konvektiven Wärmeübergangs auf die Wirksamkeit von latenter Speichermasse im Musterraum	267
	F.8 Grafische Darstellungen zum Einfluss der Orientierung auf die Wirksamkeit von latenter Speichermasse im Musterraum	274
	F.9 Grafische Darstellungen zum Einfluss der Nutzung auf die Wirksamkeit von latenter Speichermasse im Musterraum	275
	F.10 Grafische Darstellungen zum Einfluss des Klimas auf die Wirksamkeit von latenter Speichermasse im Musterraum	276
G	Anhang zu Kapitel 8	277
	G.1 Grafische Darstellungen zum Einfluss der Schmelztemperatur auf die Wirksam- keit von latenter Speichermasse im Musterraum	277
	G.2 Grafische Darstellung der Abhängigkeit der Übertemperaturgradstundenzahl des Musterraums vom Kehrwert des Wärmeeindringkoeffizienten b	279
	G.3 Grafische Darstellung der Abhängigkeit der Übertemperaturgradstundenzahl des Musterraums von der Schichtdicke der sensiblen oder latenten Speichermasse in den Wänden und der Decke.	281
	G.4 Vergleich der Raumlufttemperaturen einer Variante mit 40 mm PCM und einer hinsichtlich der Übertemperaturgradstundenzahl über 27 °C äquivalenten Variante mit 92 mm Beton	282
	G.5 Äquivalente sensible spezifische Wärmekapazität eines Latentwärmespeichers für Schmelzenthalpien von $\Delta h=60$ kJ/kg und $\Delta h=90$ kJ/kg	283

Abbildungsverzeichnis	285
Tabellenverzeichnis	298
Literaturverzeichnis	303