

**Entwicklung und Untersuchung von Polyacrylat-Beschichtungen
mit mikroverkapselten Latentwärmespeichermaterialien (mPCM)**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Abteilung Bauwissenschaften
Universität Duisburg-Essen
genehmigte

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Joachim Müller
geboren in Hüttental

Tag der mündlichen Prüfung: 26.08.2010

Gutachter:
Univ.-Prof. i.R. Dr.-Ing. Bernd Baier
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft

Vorsitzender der Prüfungskommission:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Menkenhagen

Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany

ISBN 978-3-8322-9687-2

ISSN 0945-067X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 9596-0 • Telefax: 02407 / 9596-9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort und Dank

Die vorliegende Arbeit entstand nach meiner berufspraktischen Phase als Architekt während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an den Fachgebieten "Konstruktive Gestaltung und Leichtbau" (2004 - 2008) sowie "Baustatik und Baukonstruktion" (2008 - 2010) der Universität Duisburg-Essen. Die Einsicht in die Notwendigkeit sowohl der Ressourcen- als auch der Energieeinsparung im Bauen traf sich dabei mit der eigenen Erfahrung, dass nur integrale Planungsansätze innovative Lösungen ermöglichen können. Die vorliegende Arbeit führt daher unterschiedliche Aspekte der Disziplinen Baukonstruktion, Bauphysik, Materialwissenschaften und der Gestaltung in einem ganzheitlichen und synergetischen Ansatz zusammen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. i.R. Dr.-Ing. Bernd Baier für das Vertrauen und die Möglichkeit, als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet "Konstruktive Gestaltung und Leichtbau" das Thema der Arbeit zu entwickeln, sowie für die kontinuierliche Unterstützung, Betreuung und die Erstellung des ersten Gutachtens.

Ebenso gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft für die engagierte und konstruktive Begleitung sowie die Erstellung des zweiten Gutachtens.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Menkenhagen danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission sowie die Möglichkeit, als wissenschaftlicher Mitarbeiter und akademischer Rat das begonnene Promotionsvorhaben am Fachgebiet "Baustatik und Baukonstruktion" weiterzuführen.

Ein herzlicher Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Nolte für die stete Unterstützung und die wertvollen Diskussionen in allen Bearbeitungsphasen.

Der Firma BASF, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Marco Schmidt, danke ich für das Sponsoring der Ausgangsmaterialien für die Beschichtung einschließlich des mPCM, der Firma Essedea, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Thorsten Wiener, für das Sponsoring der Abstandsgewirke. Verschiedene Einrichtungen der Universität am Campus Essen haben zudem die Durchführung unterschiedlichster Untersuchungen unterstützt, auch hierfür mein Dank. Meinen Kollegen an den beiden genannten Fachgebieten bin ich für die gute Zusammenarbeit und Ihre wertvollen Anregungen dankbar.

Ein herzlicher Dank gilt meinen Eltern für die immerwährende Unterstützung. Ganz besonders danke ich schließlich Katrin. Ihre liebevolle Begleitung und ihr Rückhalt waren wesentliche Voraussetzungen für die Fertigstellung dieser Arbeit.

Joachim Müller

Kurzfassung

Der Einsatz sogenannter Latentwärmespeicher (engl.: Phase Change Materials, PCM) kann durch das Speichern und zeitlich versetzte Abgeben von Wärme einen Beitrag zur Optimierung der thermischen Behaglichkeit von Gebäuden leisten. Temperaturschwankungen können gemindert und durch kühlere bzw. wärmere Oberflächentemperaturen Energie und technische Gebäudeausrüstungen reduziert bzw. eingespart werden, die zur Erzielung der gleichen Effekte durch Einsatz einer aktiven Klimatisierung erforderlich wären.

Die derzeit verfügbaren PCM-Verbundmaterialien für den Baubereich lassen einen großen Teil möglicher weiterer Anwendungsbereiche unberücksichtigt, welcher flexible, kleinteilige, komplex geformte und/oder nicht-mineralische Materialien für Bau- oder Ausstattungselemente umfasst. Aus diesem Mangel heraus begründet sich die Zielsetzung dieser Arbeit: die Ausstattung derartiger Elemente mit PCM zu ermöglichen, um ähnlich effizient wie mit bestehenden PCM-Verbundmaterialien die thermische Behaglichkeit in Gebäuden positiv zu beeinflussen.

Der innovative Lösungsansatz des Vorhabens liegt darin, mikroverkapselte PCM (mPCM) in Beschichtungen zu integrieren, die als Zusatzausstattung auf die Oberflächen unterschiedlichster Trägermaterialien aufgebracht werden können. Hierdurch ergibt sich eine Funktionstrennung, bei der das Substrat primär die konstruktiven und strukturellen Aufgaben im baulichen Zusammenhang erfüllt, während die PCM-haltige Beschichtung insbesondere die thermische Funktion der Latentwärmespeicherung übernimmt.

Um diesen Ansatz im Hinblick auf das Entwicklungsziel zu bewerten, werden Prototypen hergestellt und optimiert, wesentliche thermische und mechanische Charakteristika bestimmt, bevor anhand eines Monitorings und unter Verwendung eines exemplarischen Trägermaterials die Anwendbarkeit und Wirkung der Beschichtung zur Optimierung der thermischen Behaglichkeit eines Büroraums untersucht und bewertet wird.

Schlagwörter zum Inhalt: Latentwärmespeicher, PCM, Mikroverkapselung, Beschichtung, Innenraumklima, Optimierung der thermische Behaglichkeit, Energieeinsparung.

Inhalt

	Seite
Inhaltsverzeichnis	III
Verwendete Kenngrößen	VIII
1 Einführung in die Arbeit	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2 Latentwärmespeicher im Hochbau - Stand der Technik	6
2.1 Latentwärmespeicherung	6
2.2 Latentwärmespeichermaterialien (PCM)	12
2.2.1 Überblick	12
2.2.2 Salzhydrate	13
2.2.3 Paraffine	14
2.3 Konfektionierung und Anwendungsformen im Hochbau	15
2.3.1 Überblick	15
2.3.2 Direkteinbringung/ gebundene PCM	16
2.3.3 Makroverkapselung	18
2.3.4 Mikroverkapselung	20
2.4 Einfluss von Latentwärmespeichern auf die thermische Behaglichkeit	25
2.4.1 Thermische Behaglichkeit	25
2.4.2 Einfluss von Latentwärmespeichern	28
3 Neuentwicklung mPCM-haltiger Polyacrylat-Beschichtungen	32
3.1 Konzeption	32
3.1.1 Innovationsansatz	32
3.1.2 Anforderungsprofil zur Neuentwicklung PCM-haltiger Beschichtungen	33
3.1.2.1 Anforderungen an den Herstellungsprozess	33
3.1.2.2 Anforderungen an die thermischen Eigenschaften	34
3.1.2.3 Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften	35
3.1.2.4 Weitere Anforderungen	36

3.1.3	Wahl der Ausgangsstoffe für die PCM-haltigen Beschichtungen	36
3.1.3.2	PCM	37
3.1.3.3	Bindemittel und weitere Ausgangsstoffe	39
3.2	Herstellung und iterative Optimierung von Prototypen	45
3.2.1	Gegenstand, Ziel und Methodik	45
3.2.2	mPCM-Polyacrylat-Beschichtungen ohne Armierung	46
3.2.2.1	Formulierung der Beschichtungsstoffe	46
3.2.2.2	Verarbeitung	48
3.2.2.3	Trocknungsphase	50
3.2.2.4	Beschichtungen als freie Filme	50
3.2.3	Zwischenbewertung und Optimierungsansätze	52
3.2.4	mPCM-Polyacrylat-Beschichtungen mit Gewebearmierung	57
3.2.4.1	Formulierung der Beschichtungsstoffe	57
3.2.4.2	Verarbeitung	59
3.2.4.3	Trocknungsphase	60
3.2.4.4	Beschichtungen als freie Filme	60
3.2.5	Zwischenbewertung und Optimierungsansätze	64
3.2.6	mPCM-Polyacrylat-Beschichtungen mit Faserarmierung	64
3.2.6.1	Formulierung der Beschichtungsstoffe	64
3.2.6.2	Verarbeitung	66
3.2.6.3	Trocknungsphase	66
3.2.6.4	Beschichtungen als freie Filme	66
3.2.7	Zwischenbewertung	69
4	Mikroskopische Untersuchungen	71
4.1	Gegenstand, Ziel und Methodik der Untersuchungen	71
4.2	Versuchsdurchführung und Beschreibung der Ergebnisse	72
4.2.1	mPCM-Polyacrylat-Beschichtungen ohne Armierung	72
4.2.2	mPCM-Polyacrylat-Beschichtungen mit Gewebearmierung	75
4.2.3	mPCM-Polyacrylat-Beschichtungen mit Faserarmierung	76
4.3	Bewertung der Untersuchungsergebnisse	78
5	Untersuchungen zur spezifischen Enthalpie und Wärmeleitfähigkeit	80
5.1	Untersuchungen zur spezifischen Enthalpie	80
5.1.1	Gegenstand, Ziel und Methodik der Untersuchungen	80
5.1.2	Versuchsdurchführung und Beschreibung der Ergebnisse	86
5.1.3	Bewertung der Untersuchungsergebnisse	91

5.2	Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit	96
5.2.1	Gegenstand, Ziel und Methodik der Untersuchungen	96
5.2.2	Versuchsdurchführung und Beschreibung der Ergebnisse	99
5.2.3	Bewertung der Untersuchungsergebnisse	101
6	Untersuchungen zur Zugfestigkeit und Bruchdehnung	103
6.1	Gegenstand, Ziel und Methodik der Untersuchungen	103
6.2	Versuchsdurchführung und Beschreibung der Ergebnisse	104
6.2.1	mPCM-Beschichtungen ohne Armierung	104
6.2.2	mPCM-Beschichtungen mit Faserarmierung	109
6.2.3	mPCM-Beschichtungen mit Gewebeamierung	113
6.3	Bewertung der Untersuchungsergebnisse	116
7	Monitoring mPCM-beschichteter Abstandsgewirke zur Optimierung der thermischen Behaglichkeit in Büroräumen	119
7.1	Gegenstand, Ziel und Methodik der Untersuchungen	119
7.2	mPCM-beschichtete Abstandsgewirke	120
7.2.1	Abstandsgewirke	120
7.2.2	Prototypen mPCM-beschichteter Abstandsgewirke	123
7.2.2.1	Substrate, Beschichtungsstoffe und Verarbeitung	123
7.2.2.2	Variation der Abstandsgewirke und der flächenbezogenen Beschichtungsmasse	125
7.2.2.3	Variation des mPCM-Anteils der Beschichtung	129
7.2.2.4	Variation der flächenbezogenen Beschichtungsmasse	130
7.2.3	Zwischenbewertung und Auswahl eines mPCM-beschichteten Abstandsgewirks für das Monitoring	133
7.2.4	Mikroskopische Untersuchungen	138
7.3	Beschreibung von Referenz- und Versuchsraum	141
7.3.1	Lage	141
7.3.2	Konstruktion	143
7.3.3	Nutzung und Ausstattung	147
7.3.4	Messeinrichtungen	147
7.3.5	Vergleich der Räumlichkeiten hinsichtlich der Raumlufttemperatur (Leermessung)	148
7.3.6	Herstellung und Montage der Deckensegel	149
7.4	Durchführung des Monitorings und Beschreibung der Ergebnisse	152
7.4.1	Überblick	152
7.4.2	Fallbeispiel 1: Geringe Temperaturamplituden um den mPCM-Phasenwechselbereich	152

7.4.3	Fallbeispiel 2: Geringe Nachtauskühlung	155
7.4.4	Fallbeispiel 3: Hohe interne Wärmelasten und Referenztemperaturen bis 29 °C	155
7.4.5	Luftwechselrate	159
7.5	Bewertung der Ergebnisse des Monitorings	161
7.5.1	Qualitative Bewertung	161
7.5.2	Exemplarische quantitative Bewertung	164
7.5.2.1	Gegenstand, Ziel und Methodik	164
7.5.2.2	Differenz der Lüftungswärmeverluste	167
7.5.2.3	Differenz der in die raumumschließenden Flächen eingespeicherten Wärmemenge	167
7.5.2.4	Bilanz und Bewertung	169
8	Fazit	172
8.1	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	172
8.2	Ausblick	175

Verzeichnisse

V.1	Verzeichnis der Quellen	V-1
V.1.1	Literatur	V-1
V.1.2	Normen und Richtlinien	V-7
V.1.3	Online-Informationen	V-8
V.1.4	Technische Produktinformationen	V-11
V.2	Verzeichnis der Abbildungsnachweise	V-11

Anlagen

A.1	Ausgangsmaterialien	A-1
A.1.1	Mikroverkapselte PCM: Micronal DS 5008 X	A-1
A.1.2	Bindemittel: Acronal S 533	A-10
A.1.3	Dispergiermittel: Pigmentverteiler NL	A-20
A.1.4	Entschäumer: Etingal L	A-30
A.1.5	Abstandsgewirke	A-32
A.2	Rezepte zur Herstellung der mPCM-Polyacrylat-Beschichtungen	A-34

A.3	Berechnungsgrundlagen zur quantitativen Bewertung der Leistung der mPCM-Deckensegel	A-37
A.4	Messdaten	A-40
A.4.1	Untersuchungen zur spezifischen Enthalpie	A-40
A.4.2	Untersuchungen zur Zugfestigkeit und Bruchdehnung	A-44
A.4.3	Untersuchungen zur Luftwechselrate	A-62

Lebenslauf

Verwendete Kenngrößen

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
a	Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
b	Breite	m
C	Wärmekapazität	J/K
C_{wirk}	innerhalb einer Temperaturamplitude T wirksame Wärmekapazität	J/K
c_p	spezifische Wärmekapazität	$J/(kg \cdot K)$
d	Dicke	m
d_{wirk}	innerhalb einer Temperaturamplitude T wirksame Dicke einer Raumwärme-speichernden Bauteilschicht	m
E_t	Zugmodul	N/mm^2
F_t	Zugkraft	N
H	Enthalpie	J
H_m	Schmelzenthalpie	J
h	spezifische Enthalpie	kJ/kg
h_m	spezifische Schmelzenthalpie	kJ/kg
I	elektrische Stromstärke	A
l	Länge	m
m	Masse	kg
ma	flächenbezogene Masse	kg/m^2
n	Luftwechselrate	h^{-1}
P	Elektrische Leistung	W
Q	Wärmemenge	J, kWh
Q_s	sensible Wärmemenge	J, kWh
Q_l	latente Wärmemenge	J, kWh
$Q_{speicher}$	gespeicherte Wärmemenge	J, kWh
Q_v	Lüftungswärmeverlust	J, kWh
q	Wärmestromdichte	W/m^2
R_{se}	Wärmeübergangswiderstand außen	$(m^2 \cdot K)/W$
R_{si}	Wärmeübergangswiderstand innen	$(m^2 \cdot K)/W$
s	Wärmeeindringtiefe	m
s	Probenlänge	m
s_p	verbleibende plastische Verformung nach Belastung der Probe bis zum Bruch	mm

s_B	Probenlänge beim Bruch	m
T	Temperatur	°C
ΔT	Temperaturdifferenz	K
T	Periode einer Temperaturschwankung	h
T_e	Außentemperatur	°C
T_i	Innentemperatur	°C
T_m	Phasenwechseltemperatur	°C
t	Zeit	h
U	elektrische Spannung	V
V	Volumen	m ³
v_w	Windgeschwindigkeit	m/s
ε	Dehnung	%
ε_m	Dehnung bei σ_m	%
ε_{tB}	nominelle Bruchdehnung	%
η	Wirkungsgrad	-
K	Kalibrierungsfaktor	-
Λ	Wärmedurchlasskoeffizient	W/(m ² ·K)
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
v	Standardabweichung	%
ρ	Rohdichte	kg/m ³
σ	Spannung	N/mm ²
σ_m	maximal erreichte Spannung (Zugfestigkeit)	N/mm ²
Φ	Wärmestrom	W
$\Phi_{kühl}$	Kühlleistung	W
Φ_V	Lüftungswärmestrom	W