

Heiko Humpal

## **Theoretische Untersuchungen zur thermischen Bauteilaktivierung**

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

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

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 2001 Diplomica Verlag GmbH  
ISBN: 9783836634243

**Heiko Humpal**

**Theoretische Untersuchungen zur thermischen Bauteilaktivierung**



Heiko Humpal

## **Theoretische Untersuchungen zur thermischen Bauteilaktivierung**

Heiko Humpal

**Theoretische Untersuchungen zur thermischen Bauteilaktivierung**

ISBN: 978-3-8366-3424-3

Herstellung: Diplomica® Verlag GmbH, Hamburg, 2009

Zugl. Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin, Deutschland,

Diplomarbeit, 2001

---

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und der Verlag, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

© Diplomica Verlag GmbH

<http://www.diplomica.de>, Hamburg 2009

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis .....	VII
Diagrammverzeichnis .....	IX
<b>1. Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Entwicklung der Flächentemperierungssysteme .....	1
1.1.1 Geschichte .....	1
1.1.2. Schritte zur Betonkerntemperierung .....	3
1.2. Die moderne Betonkerntemperierung .....	9
1.2.1. Aufbau .....	9
1.2.2. Wirkungsweise .....	10
1.2.3. Betriebsweise .....	13
1.2.4. Integration in der Gebäudekonzeption .....	14
<b>2. Bewertung der Bauteiltemperierung und Vergleich mit anderen Systemen .....</b>	<b>15</b>
2.1. Allgemeine Bewertung .....	15
2.2. Vorteile gegenüber konventioneller Klimatechnik .....	17
2.3. Vergleich der Bauteilaktivierung mit den Kühldeckensystemen .....	21
2.4. Anwendungsgebiete der Bauteiltemperierung .....	26
<b>3. Bewertung der Literaturveröffentlichungen zum Umgang mit der thermischen Bauteilaktivierung .....</b>	<b>30</b>
3.1. Auslegung und Berechnung .....	31
3.2. Anwendungsgebiete .....	33
3.3. Der nötige Akzeptanzwillen .....	34
3.4. Einsatz zur Abdeckung von Grundlasten .....	35
3.5. Fensterlüftung contra Lüftungsanlage .....	36
3.6. Leistungsausbeute und Strahlungsasymmetrie .....	37
3.7. Zonierung / Randzonen .....	39
3.8. Verzicht auf Heizkörper .....	39

3.9.	Zonierung von Gebäudebereichen .....	40
3.10.	Wärmetransfer zwischen Gebäudeteilen .....	40
3.11.	Der Speicher .....	41
3.12.	Simulation .....	42
3.13.	Regelung .....	43
3.14.	Betriebsweise .....	44
3.15.	Raumakustik .....	45
3.16.	Widersprüche .....	46
3.17.	Planungsrisiko .....	47
3.18.	Umweltdenken und Rückkühlungsmöglichkeiten .....	48
3.19.	Zusammenfassung der Literaturrecherche .....	49
<b>4.</b>	<b>Thermodynamische Grundmechanismen der Wärmeübertragung an und in thermisch aktivierten Bauteilen</b> .....	<b>52</b>
4.1.	Die Flächenheizung / -kühlung .....	52
4.2.	Die drei Wege der Wärmeübertragung .....	53
4.2.1.	Der Wärmedurchgangskoeffizient $k$ .....	53
4.2.2.	Die Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ .....	55
4.2.3.	Wärmeübertragung durch Wärmeleitung .....	56
4.2.4.	Wärmeübertragung durch Konvektion .....	57
4.2.4.1.	Freie Konvektion an den Bauteilen .....	59
4.2.4.2.	Erzwungene Konvektion an den Bauteilen .....	60
4.2.4.3.	Der Grenzschichtprozess .....	63
4.2.5.	Wärmeübergang durch Strahlung .....	64
4.2.6.	Der kombinierte Wärmeübergangskoeffizient .....	67
<b>5.</b>	<b>Thermodynamische Vorgänge im Bauteil</b> .....	<b>69</b>
5.1.	Stationäres Verhalten von thermisch aktivierten Bauteilen [Kühlfallbetrachtung] .....	70
5.1.1.	Randbedingungen / Ausgangswerte der Beispielrechnungen .....	74
5.1.2.	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse der stationären Berechnungen .....	75
5.1.2.1.	Untersuchung der Temperaturverteilung in x-Richtung (Rohrebene) des Bauteiles .....	75
5.1.2.2.	Untersuchung der Temperaturverteilung in y-Richtung des Bauteiles .....	78

---

5.1.2.3. Oberflächentemperaturen und Kühlleistung .....	81
5.1.2.4. Speicherwärme .....	87
5.1.2.5. Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials .....	88
5.1.2.6. Einfluss der Wassergeschwindigkeit .....	90
5.1.2.7. Lage der Rohrregister im Bauteil .....	93
5.1.2.8. Auswirkungen von Boden- und Deckenbelägen .....	97
5.2. Dynamisches Verhalten von thermisch aktivierten Bauteilen .....	102
5.3. Vergleich der Rohrregister .....	104
5.3.1. Normalrohr oder Kapillarrohr .....	108
5.3.1.1. Das Kunststoff – Kapillarrohr (PP-Rohr) .....	108
5.3.1.2. Das Kunststoff-Normalrohr (PE-X-Rohr) .....	109
<b>6. Thermodynamische Vorgänge im Raum .....</b>	<b>111</b>
6.1. Die Wärmequellen .....	112
6.1.1. Innere Wärmequellen .....	113
6.1.2. Äußere Wärmequellen .....	115
6.2. Luft- und Raumtemperaturverlauf .....	117
6.2.1. Temperaturverlauf im Raum .....	117
6.2.2. Anstieg der Luft- und Raumtemperatur .....	120
6.2.3. Kühlleistungsgrenze .....	123
6.3. Simulationsberechnung .....	124
6.3.1. Darstellung eines typischen realen Verlaufes der Lufttemperatur und der operativen Raumtemperatur in betonkerntemperierten Räumen .....	125
<b>7. Entscheidungsbaum für den Planungsprozess .....</b>	<b>127</b>
<b>8. Zusammenfassung .....</b>	<b>128</b>
<b>9. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>133</b>

## Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung der Hypokaustenheizung .....	1
1.2	Aufbau der thermisch aktivierten Geschossdecke .....	9
1.3	Schematische Darstellung eines thermisch aktivierten Gebäudes .....	10
1.4	Grafische Darstellung von Heiz- und Kühlfall .....	11
4.1	Schematische Darstellung des Wärmeüberganges an einer thermisch aktivierten Geschossdecke .....	58
4.2	Kombinierter Wärmeübergangskoeffizient an den Bauteilflächen .....	68
5.1	Darstellung der thermisch aktivierten Geschossdecke .....	70
6.1	Schematische Darstellung der inneren und äußeren Lasten .....	111
6.2	Schematische Darstellung des äußeren Lasteinfallendes .....	116
6.3	Qualitative Darstellung des Temperaturverlaufes im Raum .....	118
6.4	Qualitativer Temperaturverlauf .....	119
7.1	Entscheidungsbaum zur Überprüfung eines möglichen Einsatzes der Betonkerntemperierung .....	127

## Tabellenverzeichnis

2.1	Bewertung der Eigenschaften der Bauteiltemperierung und der konventionellen Klimaanlage .....	20
2.2	Übersicht über die Vor- und Nachteile der Bauteilaktivierung und der Kühldecke .....	24
2.3	Bewertung der Eigenschaften der Bauteiltemperierung und der Kühldecke .....	25
2.4	Übersicht über die Anwendungsgebiete der Bauteilaktivierung .....	29
4.1	Wärmeleitfähigkeit von ausgesuchten Baustoffen .....	55
4.2	Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten an den Bauteilen .....	60
4.3	Strahlungszahl, Absorptionsgrad und Emissionsgrad verschiedener Stoffoberflächen .....	66
4.4	Kombinierter Wärmeübergangskoeffizient nach Wärmestromrichtung .....	68
5.1	Ermittlung der theoretisch im Bauteil speicherbaren negativen Wärmemenge .....	71
5.2	Temperaturverteilung in der Geschossdecke beim Einsatz eines Normalrohrregisters mit einem Rohrabstand von $l = 300$ mm .....	80
5.3	Temperaturverteilung in der Geschossdecke beim Einsatz eines Kapillarrohrregisters mit einem Rohrabstand von $l = 20$ mm .....	81
5.4	Wärmeübergangskoeffizienten an den Bauteiloberflächen .....	85
5.5	Rohroberfläche der Rohrregister .....	85
5.6	Lage der Rohrregister im Bauteil .....	94
5.7	Leistungsverhalten der thermisch aktivierten Geschossdecke bei verschiedenen Decken- bzw. Fußbodenaufbauten .....	99
5.8	Ladevorgangszeit .....	103
5.9	Rohrregistervarianten .....	104
5.10	Vor- und Nachteile von Normalrohr und Kapillarrohr .....	110
6.1	Wärmeabgabe des Menschen in Abhängigkeit der Tätigkeit .....	113
6.2	Strahlungs- und Konvektionsanteile verschiedener Wärmequellen .....	114

---

6.3	Leistungsabgabe, Wärmeabgabe und konvektiver Anteil für einige typische Bürogeräte im aktiven Betrieb .....	114
6.4	Richtwerte für Strahlungs- und Konvektionsanteile von äußeren Wärmequellen .....	116
6.5	Ermittlung der Kühllasten unter Berücksichtigung des Wärmeabgabeverhaltens der Quellen .....	122

## Diagrammverzeichnis

4.1	Darstellung der Reynoldszahl in Abhängigkeit der Wassergeschwindigkeit .....	62
4.2	Darstellung des Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der Wassergeschwindigkeit .....	63
5.1	Temperaturwelligkeit in der Rohrebene ( $l = 300 \text{ mm}$ ) .....	76
5.2	Temperaturwelligkeit in der Rohrebene ( $l = 200 \text{ mm}$ ) .....	76
5.3	Temperaturwelligkeit in der Rohrebene ( $l = 150 \text{ mm}$ ) .....	76
5.4	Temperaturwelligkeit in der Rohrebene ( $l = 100 \text{ mm}$ ) .....	76
5.5	Temperaturwelligkeit in der Rohrebene ( $l = 40 \text{ mm}$ ) .....	77
5.6	Temperaturwelligkeit in der Rohrebene ( $l = 30 \text{ mm}$ ) .....	77
5.7	Temperaturwelligkeit in der Rohrebene ( $l = 20 \text{ mm}$ ) .....	77
5.8	Temperaturwelligkeit in der Rohrebene in Abhängigkeit des Rohrabstandes .....	78
5.9	Temperaturverlauf in der y-Richtung der Geschosdecke über einem Normalrohr ( $d=20 \times 2 \text{ mm}$ ) bei verschiedenen Rohrabständen .....	79
5.10	Temperaturverlauf in der y-Richtung der Geschosdecke über einem Kapillarrohr ( $d=4,3 \times 0,9 \text{ mm}$ ) bei verschiedenen Rohrabständen .....	79
5.11	Mittlere Bauteiloberflächentemperaturen in Abhängigkeit des Rohrabstandes .....	82
5.12	Stationäre Gesamtkühlleistung in Abhängigkeit des Rohrabstandes .....	83
5.13	Stationäre Kühlleistung der Decke und des Fußbodens in Abhängigkeit des Rohrabstandes .....	83
5.14	Wärmeübergangskoeffizient an den Bauteiloberflächen in Abhängigkeit des Rohrabstandes .....	84
5.15	Kühlleistung in Abhängigkeit der installierten Rohroberfläche .....	86
5.16	Negative Speicherwärmemenge im Bauteil in Abhängigkeit des Rohrabstandes .....	87
5.17	Negative Speicherwärme im Bauteil in Abhängigkeit der installierten Rohroberfläche im Bauteil .....	88

5.18	stationäre Kühlleistung in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials .....	89
5.19	Speicherwärmemenge in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Rohrmaterials .....	89
5.20	Stationäre Kühlleistung in Abhängigkeit der Wassergeschwindigkeit in Normalrohrregistern .....	90
5.21	Speicherwärmemenge im Bauteil in Abhängigkeit der Wassergeschwindigkeit in Normalrohrregistern .....	90
5.22	Stationäre Kühlleistung in Abhängigkeit der Wassergeschwindigkeit in Kapillarrohrregistern .....	91
5.23	Speicherwärmemenge im Bauteil in Abhängigkeit der Wassergeschwindigkeit in Kapillarrohrregistern .....	92
5.24	Stationäre Kühlleistung der Decke und des Fußbodens in Abhängigkeit der Lage des Rohrregisters im Bauteil .....	95
5.25	Stationäre Gesamtkühlleistung der Decke und des Fußbodens in Abhängigkeit der Lage des Rohrregisters im Bauteil .....	96
5.26	Negative Speicherwärmemenge der Decke und des Fußbodens in Abhängigkeit der Lage des Rohrregisters im Bauteil .....	97
5.27	Betrachtung der Ladezustände in Abhängigkeit der Ladezeit .....	103
5.28	Untersuchung verschiedener Rohrdimensionen in Bezug auf die stationäre Kühlleistung der Geschossdecke .....	105
5.29	Untersuchung verschiedener Rohrdimensionen in Bezug auf die speicherbare Wärmemenge in der Geschossdecke .....	105
5.30	Vergleich der stationären Kühlleistung verschiedener Rohrregister .....	106
5.31	Vergleich der negativen Speicherwärmemenge verschiedener Rohrregister .....	107
6.1	Zulässige Kühllasten während eines 8 h Betriebes in Funktion eines gewählten Lufttemperaturanstiegs .....	121
6.2	Zulässige Kühllasten während eines 8 h Betriebes in Funktion eines gewählten Raumtemperaturanstiegs .....	121
6.3	Darstellung der Temperaturen im Tagesverlauf .....	125

# 1. Einführung

## 1.1. Entwicklung der Flächentemperierungssysteme

### 1.1.1. Geschichte

Das erste Flächentemperierungssystem stammt nachweislich von dem Römer Caius Sergius Orata ca. 100 v. Chr.. In der von ihm überlieferten „Hypokaustenheizung“ (Abbildung 1.1) leitete er die Rauchgase eines Feuers, dessen Feuerraum sich am Rand des Fundamentbereiches befand, durch einen Doppelboden und führte sie dann durch die in der Wand integrierten rechteckigen Ton-Rauchgasabzüge ab. Durch die Wärmeabgabe der Rauchgase an die Fußbodenplatte und somit an den darüberliegenden Raum wurde eine gute Heizwirkung erzielt.

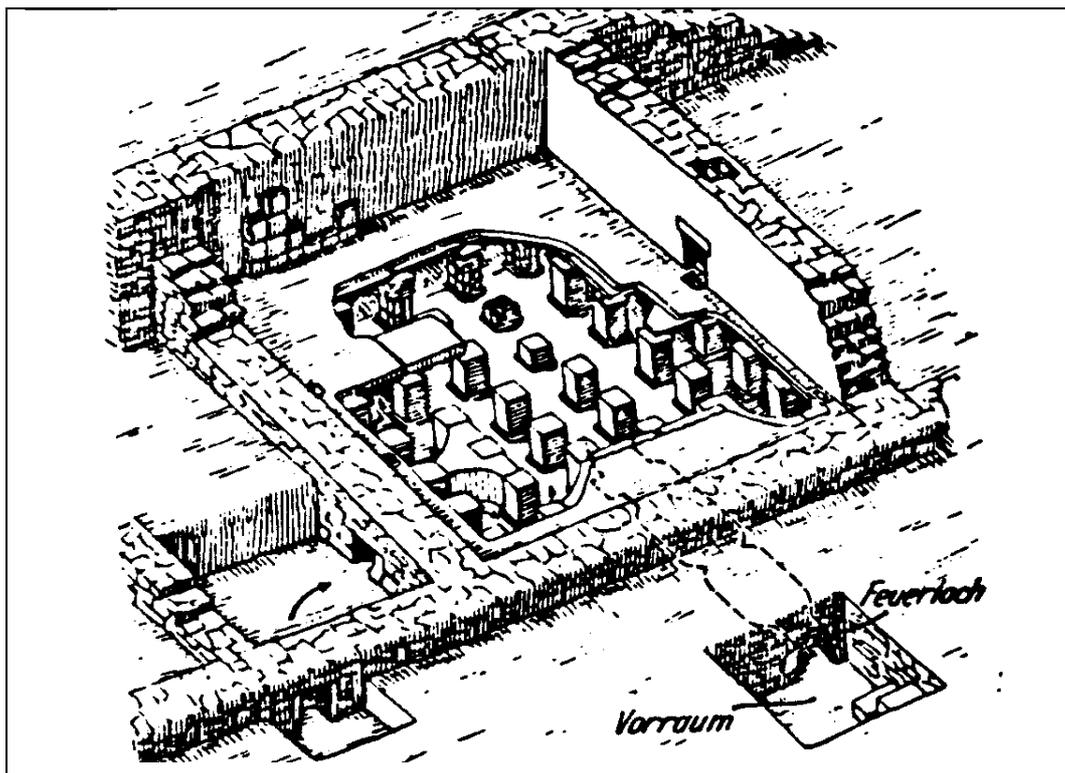


Abbildung 1.1 Schematische Darstellung der Hypokaustenheizung (100 v. Chr.) [ 1 ]

Damit war die erste Flächenheizung geschaffen. Diese wies jedoch gravierende Mängel auf. Auf Grund der fehlenden modernen Rohrtechnik war es nicht möglich eine annähernd gleichmäßige Wärmeverteilung zu realisieren. Die Durchlässigkeit der verwendeten Baustoffe und Bautechniken für Rauchgase und die damit