

Annika Nele Radermacher

Passive Kühlsysteme

Potenziale zur Verbesserung des sommerlichen
Wärmeverhaltens von Gebäuden und
Bewertung am Beispiel der Sohlplattenkühlung

Annika Nele Radermacher

Passive Kühlsysteme

Potenziale zur Verbesserung des sommerlichen
Wärmeverhaltens von Gebäuden und Bewertung
am Beispiel der Sohlplattenkühlung

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Anton Maas, Universität Kassel
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Reul, Universität Kassel

Weitere Mitglieder der Prüfungskommission:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Knissel, Universität Kassel
Dr. Dietrich Schmidt, Fraunhofer IEE

Tag der mündlichen Prüfung: 18. November 2019



Diese Veröffentlichung – ausgenommen Zitate und anderweitig gekennzeichnete Teile – ist unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen International (CC BY-SA 4.0: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>) lizenziert.

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

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2019
ISBN 978-3-7376-0854-1
DOI: <https://doi.org/doi:10.17170/kobra-202010201975>

© 2020, kassel university press, Kassel
<https://kup.uni-kassel.de>

Printed in Germany

Danksagung

Unterstützung, Austausch, Kritik, Freiheit, Zuspruch, Geduld, Abwechslung. All dies sind Bausteine, welche für den Erfolg einer solchen Arbeit elementar sind. In dieser Hinsicht hat es mir während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel an nichts gefehlt.

Prof. Dr.-Ing. Anton Maas danke ich für die Unterstützung von der Themenfindung bis hin zur finalen Ausarbeitung, die Beratung bei zahlreichen Knackpunkten, die Fokussierung auf elementare Aspekte der Arbeit und für die fruchtbaren Doktorandenkolloquien. Prof. Dr.-Ing. Oliver Reul danke ich für die Bereitschaft, meine Arbeit als Zweitgutachter zu betreuen, für sein wertvolles Feedback und sorgsame Durchsicht der Arbeit.

Eine erfüllende Zeit an der Universität mit willkommener Ablenkung in den Pausen haben mir vor allem meine ehemaligen KollegInnen Nadine, Swen, Annika und Kilian beschert – Juan und Christiane waren stets hilfsbereit beim Umgang mit den Tücken und Fehlerquellen, die eine Simulationssoftware mit sich bringt. Danke euch!

Meiner Freundin Gina danke ich von ganzem Herzen für die Unterstützung beim Abschluss der Arbeit und die inhaltlich kritische, aber auch oft amüsante Kommentierung, die mich während der finalen Bearbeitung immer wieder schmunzeln ließ.

Mein Mann Christian hat der Arbeit den letzten sprachlichen Schliff gegeben, mir den Rücken gestärkt und dabei die notwendige Gelassenheit vermittelt. Hierfür bin ich ihm unglaublich dankbar.

Abschließend möchte ich meiner Familie für die Zuversicht und den konsequenten Rückhalt danken, den ich bei ihr gefunden habe. Besonders mein Vater hat mich bei unseren regelmäßigen Gesprächen oft aufgebaut und bestärkt.

Kurzfassung

Die passive Kühlung umfasst Systeme, bei denen Energie ausschließlich zur Förderung des Kühlmediums benötigt wird, wie beispielsweise thermisch aktivierte Bauteile kombiniert mit einer Kühlung über das Erdreich oder Systeme mit Kühlung über indirekte Verdunstung. Diese Kühlsysteme bieten das Potenzial, behagliche Innentemperaturen zu schaffen, ohne einen hohen elektrischen Energiebedarf zu verursachen und stellen somit einen umweltfreundlichen Umgang mit anhaltenden Hitzeperioden dar. Aufgrund dieser positiven Eigenschaften ist eine steigende Nachfrage nach effizienten Kühlsystemen zu beobachten.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Bewertung passiver Kühlsysteme. Neben der grundsätzlichen Funktionsweise werden die Möglichkeiten und Grenzen verschiedener passiver Kühlsysteme aufgezeigt. Darüber hinaus wird das System der Bauteilaktivierung in Kombination mit einer Kühlung über die Sohlplatte einer Parameterstudie mithilfe der Simulationsumgebung TRNSYS unterzogen. Hierbei erfolgt eine Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes nach [DIN 4108-2:2013-02], des thermischen Komforts nach [DIN EN 15251:2012-12] und der Energieeffizienz, bewertet anhand des Hilfsenergiebedarfs und der Jahresarbeitszahlen. Zudem wird eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit dem vereinfachten Nachweisverfahren zum sommerlichen Wärmeschutz gemäß [DIN 4108-2:2013-02] vorgenommen.

Die Erkenntnisse münden in einer Formulierung von Planungsempfehlungen. Hierbei werden sowohl bauliche und anlagentechnische Aspekte beleuchtet als auch die Nachweismethodik des sommerlichen Wärmeschutzes und die Vorgehensweise bei der Simulation.

Die Sohlplattenkühlung sticht gegenüber anderen Systemen durch ihre Einfachheit in der Umsetzung hervor, da je nach Platzierung der wärmeübertragenden Rohre nur ein geringfügiger zusätzlicher Erdaushub erforderlich ist und die Zusatzinvestitionen somit niedrig ausfallen. Der Nutzen des Systems weist eine hohe Abhängigkeit von den Randparametern auf, wie beispielsweise den Erdreich-eigenschaften, der Geschosshöhe und dem Lüftungskonzept. Dennoch erlauben die Ergebnisse der Parameterstudie die Aussage, dass die Sohlplattenkühlung hohe Potenziale zur Senkung der Übertemperaturgradstunden bei niedrigem Energiebedarf für den Pumpenbetrieb aufweist.

Um den Einsatz solcher effizienter Kühlsysteme zukünftig zu vereinfachen und zu steigern, sollte die Normierung der verstärkten Nachfrage nachkommen und neue bzw. überarbeitete Auslegungs-, Berechnungs- sowie Nachweisverfahren für die passive Kühlung etablieren.

Abstract

Passive cooling of buildings comprises systems, which use energy only for the transport of a heat transfer medium. Examples are thermally activated building components combined with a cooling via the foundation plate or a geothermal heat exchanger, but also systems which use indirect evaporation for the cooling of buildings. These cooling systems provide the potential of maintaining comfortable room temperatures without causing a high energy demand. Thus, they are an environmentally friendly way of handling long lasting heat waves in summer. Due to these advantages, an increasing demand for efficient cooling systems can be observed.

This dissertation contributes to the evaluation of passive cooling systems. Besides the general functionality, the possibilities and limitations of different systems are discussed. Moreover, thermally activated building components combined with a cooling via the foundation plate are analysed in parameter studies using the simulation software TRNSYS. The results are evaluated regarding the heat protection in summer according to [DIN 4108-2:2013-02], the thermal comfort according to [DIN EN 15251:2012-12] and the energy efficiency by identifying the auxiliary energy demand and the seasonal performance factor. Furthermore, the simulation results are compared to the simplified verification procedure of the summer heat protection referring to [DIN 4108-2:2013-02].

The evaluation leads to planning recommendations for passive cooling systems. In addition to building and technical aspects, the verification procedure of the summer heat protection and the method of the simulation are reviewed and discussed.

Compared to other systems, the foundation cooling stands out due to its simplicity. It only requires a low amount of ground excavation, if the heat transferring pipes are placed close to the foundation plate. This results in low investment costs. However, the benefit of the system depends highly on parameters like geothermal properties, the number of floors and the ventilation concept. Nevertheless, the results allow the conclusion that cooling via the foundation plate has a high potential to reduce the room temperatures while performing with a low energy demand for the operation of the pump.

In order to simplify and to promote the application of such efficient cooling systems, the standardization should respond to the rising demand and establish new and revised methods for the dimensioning, the calculation and the verification of passive cooling systems.

Inhalt

Danksagung.....	III
Kurzfassung.....	V
Abstract.....	VII
Inhalt.....	IX
Nomenklatur.....	XII
Begriffe und Definitionen.....	XV
1 Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung.....	2
1.2 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit.....	4
1.3 Motivation.....	6
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	9
2.1 Normative Grundlagen.....	9
2.1.1 Sommerlicher Wärmeschutz von Gebäuden.....	9
2.1.2 Bewertung des thermischen Komforts.....	11
2.2 Begriffsdefinition passive Kühlung.....	16
2.3 Übergabesysteme zur passiven Kühlung.....	18
2.3.1 Luftgeführte Systeme.....	18
2.3.2 Wassergeführte Systeme.....	19
2.3.3 Planungshinweise zur Bauteilaktivierung.....	21
2.4 Wärmesenken zur passiven Kühlung.....	26
2.4.1 Kühlung über die Außenluft.....	26
2.4.2 Kühlung über das Erdreich.....	37
2.4.3 Kombinierte Kühlung über Außenluft und Erdreich.....	48
2.4.4 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Nutzung des Erdreichs.....	52
2.4.5 Einfluss der Untergrundeigenschaften.....	53
2.5 Voraussetzungen und Grenzen passiver Kühlsysteme.....	56
3 Simulationsumgebung und Modellaufbau.....	59
3.1 Beschreibung der eingesetzten Software TRNSYS.....	59
3.2 Möglichkeiten der Modellierung erdgekoppelter Systeme mit TRNSYS.....	61
3.3 Plausibilitätsprüfung.....	62

3.3.1	Vergleichsrechnungen anhand des Prüfraums nach DIN EN ISO 13791 ...	62
3.3.2	Korrekte Verwendung der Testreferenzjahre in TRNSYS	66
3.4	Auswahl eines passiven Kühlsystems für die Parameterstudien	68
3.5	Modellaufbau	69
3.5.1	Auswahl und Aufbau eines Gebäudemodells.....	69
3.5.2	Simulationsmodell der Bauteilaktivierung	73
3.5.3	Simulationsmodell der Sohlplattenkühlung und des Erdreichs	75
3.5.4	Anlagenschema.....	81
3.5.5	Pumpen- und Rohrauslegung	82
3.5.6	Regelstrategien	86
3.6	Simulationsrandbedingungen und Variationsparameter	88
3.6.1	Berechnungsrandbedingungen gemäß DIN 4108-2:2013-02	88
3.6.2	Bauliche Randbedingungen.....	92
3.6.3	Erdreichparameter	95
3.6.4	Übersicht der variierten Parameter und Definition des Basisfalls	96
4	Parameterstudie zum sommerlichen Wärmeschutz.....	99
4.1	Referenzfall ohne Kühlung.....	99
4.2	Basisfall.....	101
4.3	Parametervariation.....	101
4.3.1	Luftwechsel.....	102
4.3.2	Bauart	103
4.3.3	Geschosszahl	103
4.3.4	Unterer Gebäudeabschluss	104
4.3.5	Wärmeschutzniveau Außenwände	106
4.3.6	Massenstrom	107
4.3.7	Erdreieigenschaften.....	107
4.3.8	Klimadaten.....	108
4.3.9	Interne Wärmeeinträge	111
4.3.10	Rohrlagen und -eigenschaften	112
4.3.11	Zwischenfazit der Parameterstudie	115
5	Komfortbewertung	116
5.1	Referenzfall ohne Kühlung.....	117

5.2	Basisfall.....	119
5.3	Ausgewählte Parametervariationen	120
5.3.1	Nachtlüftung	121
5.3.2	Bauart	122
5.3.3	Erdreieheigenschaften.....	123
5.3.4	Klimadaten.....	124
5.4	Gegenüberstellung ausgewählter Fälle.....	125
6	Hilfsenergiebedarf und Jahresarbeitszahlen	128
7	Gegenüberstellung Simulation und vereinfachtes Nachweisverfahren	132
7.1	Referenzfall ohne Kühlung.....	133
7.2	Ausgewählte Parametervariationen	133
7.3	Zwischenfazit	137
8	Planungsempfehlungen	139
8.1	Planungsempfehlungen für den Einsatz einer Sohlplattenkühlung.....	139
8.2	Nachweismethodik und Empfehlungen für die Simulation.....	145
9	Zusammenfassung und Ausblick	149
	Literaturverzeichnis	154
	Abbildungsverzeichnis	164
	Tabellenverzeichnis	168
	Anhang A Strahlungsdaten.....	170
	Anhang B Geometrie.....	171
	Anhang B.1 Flächenberechnung	171
	Anhang B.2 Grundrisse des Mehrfamilienhauses.....	173
	Anhang B.3 Schnitte des Mehrfamilienhauses.....	174
	Anhang C Bauteilaufbauten.....	175
	Anhang C.1 Bauteilaufbauten leichte Bauart	175
	Anhang C.2 Bauteilaufbauten mittlere Bauart.....	177
	Anhang C.3 Bauteilaufbauten schwere Bauart	179
	Anhang C.4 Kellerbauteile (bauartunabhängig)	181

Nomenklatur

Lateinische Zeichen

Zeichen	Einheit	Erläuterung
a	[m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit
A	[m ²]	Fläche
c	[J/(kgK)]	spez. Wärmekapazität
C	[Wh/K]	Wärmespeicherfähigkeit
d	[m]	Dicke
f	[-], [%]	Fensterflächenanteil
F	[-]	(Abminderungs)faktor
g	[-]	Gesamtenergiedurchlassgrad
Gh	[Kh/a]	Übertemperaturgradstunden
h	[W/(m ² K)]	Wärmeüberganskoeffizient
h	[kJ/kg]	Enthalpie
\dot{m}	[kg/h]	Massenstrom/Frischwasserbedarf
Me	[-]	Merkelzahl
n	[1/h]	Luftwechsel
p	[Pa]	Druck
Q	[Wh]	Energiebedarf
r	[kJ/kg]	spez. Verdampfungswärme
R	[(m ² K)/W]	Wärmewiderstand
S	[-]	Sonneneintragskennwert
β	[kg/(m ² s)]	Stoffübergangskoeffizient
t	[h]	Zeit
U	[W/(m ² K)]	Wärmedurchgangskoeffizient
V	[m ³]	Volumen
x	[kg/kg]	Feuchtegehalt der Luft (kg Wasserdampf je kg Luft)

Griechische Zeichen

Zeichen	Einheit	Erläuterung
λ	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit
Φ	[-]	Kühlwirkungsgrad
v	[m/s]	Windgeschwindigkeit über der Oberfläche
ρ	[kg/m ³]	Rohdichte
θ	[°C]	Temperatur
v	[m/s]	Windgeschwindigkeit über der Oberfläche

Indizes

Index	Erläuterung	Verwendet für
0	Tripelpunkt	spez. Verdampfungswärme am Tripelpunkt r_0
AB	Abluft	Ablufttemperatur θ_{AB}
adia	adiabat	adiabater Kühlwirkungsgrad
c	konvektiv (engl.: convective)	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient h_c
c	kühlen (engl.: cooling)	Kühlenergie Q_c
C	Index Fc-Wert	Abminderungsfaktor Sonnenschutz Fc-Wert
D	Dampf	Wasserdampfpartialdruck p_D , spez. Wärmekapazität des Wasserdampfes $c_{p,D}$
e	außen (engl.: external)	Außen-Lufttemperatur θ_e
f	fassadenbezogen	fassadenbezogener Fensterflächenanteil $f_{w,f}$
f	Feuchtkugel	Feuchtkugeltemperatur θ_f
F	Rahmen (engl.: frame)	Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens U_F
g	grundflächenbezogen	grundflächenbezogener Fensterflächenanteil $f_{w,g}$
g	Glas (engl.: glazing)	Wärmedurchgangskoeffizient des Glases U_g
G	Grundfläche	Grundfläche A_G
h	Heizzwecke	Soll-Raumtemperatur für Heizzwecke $\theta_{h,soll}$
i	innen (engl.: internal)	Innenlufttemperatur θ_i
L	Luft	Enthalpie feuchter Luft h_L , spez. Wärmekapazität der trockenen Luft $c_{p,L}$
Luft	auf die Luft bezogen	Innenlufttemperatur $\theta_{i,Luft}$
max	Maximalwert	oberer Grenzwert $\theta_{i,max}$
min	Minimalwert	unterer Grenzwert $\theta_{i,min}$
op	Operativ	operative Temperatur
p	Druck	spez. Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p
RL	Rücklauf	Rücklauftemperatur θ_{RL}
rm	Mittelwert	gleitender Mittelwert der Außentemperatur
s	Oberfläche (engl.: surface)	Oberflächentemperatur innen/außen θ_{si}/θ_{se}
s	gesättigt (engl.: saturated)	Enthalpie gesättigter Luft h_s
soll	Sollwert	Soll-Raumtemperatur für Heizzwecke $\theta_{h,soll}$
tot	total	Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases einschließlich Sonnenschutz
VL	Vorlauf	Vorlauftemperatur
vorh	vorhanden	vorhandener Sonneneintragskennwert
w	Fenster (engl.: window)	Fensterfläche A_w , Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters U_w
W	Wasser	Wasserein-/Wasseraustrittstemperatur θ_w
wirk	wirksam	wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk}
x	Wert x oder Bezugstemperatur x	anteiliger Sonneneintragskennwert S_x , Übertemperaturgradstunden Gh_x
ZU	Zuluft	Zulufttemperatur θ_{ZU}
zul	zulässig	zulässiger Sonneneintragskennwert

Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
BTA	Bauteilaktivierung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EFH	Einfamilienhaus
EWS	Erdwärmesonde
JAZ	Jahresarbeitszahl
L-EWT	Luft-Erdwärmetauscher
MFH	Mehrfamilienhaus
MEZ	Mitteuropäische Zeit
SPK	Sohlplattenkühlung
TRNSYS	Transient System Simulation
TRY	Testreferenzjahr (engl.: Test Reference Year)
WOZ	Wahre Ortszeit
WRG	Wärmerückgewinnung

Begriffe und Definitionen

Operative Temperatur

Die operative Temperatur θ_{op} ist definiert als die theoretische gleichmäßige Temperatur eines abgeschlossenen Raumes, in dem ein Nutzer die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion wie im tatsächlichen ungleichmäßigen Raum abgeben oder aufnehmen würde [DIN EN 12792:2004-01]. Sie ist der Mittelwert aus Raumlufttemperatur und mittlerer Oberflächentemperatur der Raumumschließungsflächen [E VDI 6020:2016-09].

Gleitender Mittelwert der Außentemperatur

Der gleitende Mittelwert der Außentemperatur θ_{rm} ist definiert als der exponentiell gewichtete gleitende Mittelwert der Tagesaußentemperatur und wird nach [DIN EN 15251:2012-12] berechnet. Vereinfachend kann er nach folgender Formel ermittelt werden:

$$\theta_{rm} = \left(\begin{array}{l} \theta_{ed-1} + 0,8 \cdot \theta_{ed-2} + 0,6 \cdot \theta_{ed-3} + 0,5 \cdot \theta_{ed-4} \\ + 0,4 \cdot \theta_{ed-5} + 0,3 \cdot \theta_{ed-6} + 0,2 \cdot \theta_{ed-7} \end{array} \right) / 3,8 \quad (0-1)$$

mit θ_{ed-1} [°C] der Tagesmittelwert der Außentemperatur für den vorherigen Tag

θ_{ed-2} [°C] der Tagesmittelwert der Außentemperatur für den vorvorherigen Tag usw.

Wirksame Wärmespeicherfähigkeit

Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} ist gemäß [DIN 4108-6:2003-06] der Teilbetrag der Wärmespeicherfähigkeit eines Gebäudes, der einen Einfluss auf den Heizwärmebedarf und auf die sommerliche Raumkonditionierung hat. Sie berücksichtigt nur Wärmespeichereinflüsse bis zu einer bestimmten Schichtdicke, da beispielsweise Dämmstoffe dahinter liegende Speichermassen vom Raum abschirmen. Es gehen daher nur „wirksame“ Schichten in die Berechnung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit ein. Die Berechnung erfolgt nach folgender Gleichung:

$$C_{wirk} = \sum_i (c_i \cdot \rho_i \cdot d_i \cdot A_i) \quad (0-2)$$

mit c [J/(kgK)] spez. Wärmekapazität
 ρ [kg/m³] Rohdichte
 d [m] wirksame Schichtdicke
 A [m²] Fläche des Bauteils

Übertemperaturgradstunden

Die Übertemperaturgradstunden Gh_x sind die Anforderungsgröße der [DIN 4108-2:2013-02] und geben die Summe der Differenzen zwischen der operativen Temperatur θ_{op} und der Grenz- bzw. Bezugstemperatur $\theta_{b,op}$ an, sofern die operative Temperatur diese überschreitet. Die Differenzen werden für das gesamte Jahr aufsummiert und ergeben damit die Übertemperaturgradstunden. Für die Übertemperaturgradstunden gilt somit folgende Formel:

$$Gh_{\theta_{b,op}} = \sum_{i=1}^{8760} (\theta_{op} - \theta_{b,op}) \cdot 1h|_{pos.} \quad (0-3)$$

Der Bezugswert der operativen Innentemperatur $\theta_{b,op}$ ist gemäß [DIN 4108-2:2013-02] für die drei Klimaregionen A, B und C mit 25 °C, 26 °C und 27 °C festgelegt.

Überschreitungshäufigkeiten

Die Überschreitungshäufigkeiten geben die Anzahl der Stunden im Jahr an, an denen die operative Raumtemperatur über einer bestimmten Bezugstemperatur liegt. Sie stellen die ehemalige Anforderungsgröße der [DIN 4108-2:2003-07] zum Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes dar. Die jeweilige Grenztemperatur durfte maximal an 10 % der Aufenthaltszeit (bei Wohngebäuden üblicherweise 24 h/d, bei Bürogebäuden 10 h/d) überschritten werden. Auch bei der Bewertung des thermischen Komforts nach [DIN EN 15251:2012-12] kann eine Auswertung der Überschreitungshäufigkeiten für bestimmte Grenzwerte vorgenommen werden.

Feuchtkugeltemperatur

Die Feuchtkugeltemperatur, auch als Kühlgrenztemperatur bezeichnet, ist die tiefste Temperatur, bis zu der Wasser in einer Kühlanlage mit nichtgesättigter Luft heruntergekühlt werden kann. Die dabei stattfindende Verdunstung erfolgt dadurch, dass der Luft Wärme entzogen wird. Je niedriger der Feuchtigkeitsgehalt der Luft im Ausgangszustand ist, desto mehr Wasser kann verdunsten und desto höher ist die mögliche Temperaturabsenkung. Die Feuchtkugeltemperatur hat somit maßgeblichen Einfluss auf die Leistung einer adiabaten Kühlung und einer Rückkühlung mithilfe eines Nasskühlers.

Zur Messung der Feuchtkugeltemperatur kommt ein strahlungsgeschütztes Psychrometer zum Einsatz, in welchem sich zwei Thermometer befinden: Eines misst die Lufttemperatur (Trockenkugeltemperatur) und das andere die Feuchtkugeltemperatur mithilfe eines in Wasser getränkten Baumwollstrumpfs. Ein Gebläse erzeugt dabei einen gleichmäßigen Luftstrom, um für ausreichende Verdunstung zu sorgen. Sind die beiden Temperaturen bekannt, kann die relative

Luftfeuchte anhand eines psychrometrischen oder h,x-Diagramms bestimmt werden [Ihle 2006, 124].

Trockenkugeltemperatur

Analog zur Feuchtkugeltemperatur wird die Lufttemperatur, welche am trockenen Thermometer gemessen wird, häufig Trockenkugeltemperatur genannt. Sie kann mittels allgemein bekannter Temperaturmessmethoden, wie z. B. anhand eines Quecksilberthermometers, ermittelt werden.

Kühlmittel und Kältemittel

Kältemittel sind in der Lage, Wärme entgegen einem Temperaturgradienten zu übertragen. Die Umgebungstemperatur kann somit höher als die Temperatur des zu kühlenden Raums sein. Mithilfe eines Kühlmittels erfolgt die Wärmeübertragung dagegen lediglich entlang des Temperaturgradienten.

Kältemittel kommen bei der passiven Kühlung nicht zum Einsatz. Kühlmittel werden beispielsweise bei Rückkühlwerken benötigt, hier in Form von Kühlwasser.

Kühlwasser

Kühlwasser, welches z. B. bei Rückkühlwerken zur Verdunstungskühlung benötigt wird, ist Wasser, das häufig chemisch aufbereitet wird, um Ablagerungen, Korrosion oder Einfrieren im Winter und dadurch bedingte Anlagenschäden zu vermeiden. Es kann Grund-, Brunnen- und Oberflächenwasser (Flüsse, Seen) oder auch Trinkwasser verwendet werden, wobei es aus Kostengründen sinnvoll ist, erwärmtes Trinkwasser für andere Zwecke zu nutzen. Vorteilhaft an der Verwendung von Trinkwasser ist, dass dieses im Gegensatz zu den anderen Wasserquellen nicht gereinigt werden muss [Rietschel und Fitzner 2008, 656ff].



1 Einleitung

Länger anhaltende Hitzeperioden im Sommer, erhöhte Ansprüche an behagliche Raumtemperaturen und hohe Glasanteile an Gebäudefassaden bringen eine wachsende Nachfrage und Notwendigkeit effizienter Kühlsysteme mit sich. Der Einsatz passiver Kühlsysteme erhält dabei für die Reduzierung des Energieverbrauchs von Gebäuden mit Hinblick auf den Umweltschutz und die Energiekosten eine zunehmende Bedeutung.

Herkömmliche Klimaanlageanlagen, bei welchen die Bereitstellung von Kälte unter Zuhilfenahme eines Kältemittels und elektrischer Energie erfolgt, weisen gegenüber passiven Kühlsystemen einen erhöhten elektrischen Energiebedarf auf. Sie werden meist im Rahmen des derzeitig regulären Strom-Mix betrieben, welcher nach wie vor zum überwiegenden Anteil durch fossile Brennstoffe erzeugt wird und damit einhergehend hohe CO₂-Emissionen verursacht. Zu einer ungünstigen Ökobilanz kommt ein in den letzten Jahrzehnten stetig gestiegener Strompreis. Diese Problematik betrifft besonders Nichtwohngebäude, welche häufig große Fensterflächen aufweisen, um eine gute Tageslichtversorgung sicherzustellen oder eindrucksvolle Raumsituationen zu schaffen und dadurch einen erhöhten Kühlbedarf aufweisen. Zudem sind die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit am Arbeitsplatz höher als im Wohnbereich, denn mit abnehmender Behaglichkeit sinkt auch die Leistungsfähigkeit des Menschen [Hausladen et al. 2004].

Nach [Bettgenhäuser et al. 2011] ist jedoch auch im Wohngebäudebereich von einer starken Zunahme des Kühlenergiebedarfs auszugehen. Die steigenden Komfortbedürfnisse und Außentemperaturen führen bereits zu einem erhöhten Einsatz von Anlagen zur maschinellen Kühlung sowohl in Büro- als auch in Wohngebäuden [Barthel et al. 2010]. Gemäß [Plate 2016] ist ein zunehmendes Interesse an effizienten Kühlsystemen im Wohnungsbau zu beobachten. Insbesondere Systeme, die im Winter der Beheizung dienen und im Sommer einen Zusatznutzen als Kühlung bieten, sind im Wohnungsbau attraktiv, da sie geringe Investitions- und Betriebskosten aufweisen. Häufig reichen hier passive Systeme, die in der Regel keine Aufrechterhaltung einer konstanten Raumtemperatur sicherstellen können, aus, da die Anforderungen gegenüber Nichtwohngebäuden niedriger sind.

Um dem Einsatz fossiler Energieträger entgegenzuwirken, sollte daher das Minimieren der Wärmebelastung mittels passiver Maßnahmen einen hohen

Stellenwert bei der Planung energieeffizienter Gebäude erhalten. Passive Kühlsysteme, wie beispielsweise eine Bauteilaktivierung mit Kühlung über einen Erdwärmeübertrager oder eine Lüftungsanlage kombiniert mit indirekter Verdunstungskühlung sind vielfach in der Lage, ein thermisch behagliches Klima in Gebäuden herzustellen. Wie sich diese Systeme im Detail auf die sommerlichen Raumtemperaturen auswirken, wurde bislang jedoch nicht hinreichend untersucht. Es besteht ein Mangel an Auslegungskriterien und Planungsempfehlungen zur Gewährleistung eines effektiven und effizienten Betriebs der Systeme.

Im Zuge der Novellierung der DIN 4108-2 im Jahr 2013 wurde eine Anrechnung der passiven Kühlung als Maßnahme zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes zulässig. Zudem wurden die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz verschärft, womit die Notwendigkeit des Einsatzes einer passiven Kühlung steigt und damit auch die Bedeutsamkeit der Forschungsarbeit in diesem Gebiet. Ein steigendes Interesse an solchen Systemen ist daher zukünftig zu erwarten.

1.1 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zur Bewertung passiver Kühlsysteme im Hinblick auf das sommerliche Wärmeverhalten von Gebäuden zu leisten und die bestehenden Planungsempfehlungen zu verbessern. Dazu bedarf es zunächst einer genaueren Begriffsdefinition: Wodurch ist die passive Kühlung gekennzeichnet und welche Systeme gelten als passiv?

Bei der Auslegung von passiven, insbesondere erdreichgekoppelten Kühlsystemen bestehen Defizite hinsichtlich der vorzunehmenden Dimensionierung und der erforderlichen Voraussetzungen. Häufig werden die erwarteten positiven Effekte nicht erreicht, was unter Umständen zu einem nachträglichen Einsatz einer aktiven Kühlung führen kann. Es existieren Unklarheiten bzgl. der verschiedenen Einflussfaktoren. So haben z. B. das Verhältnis von Geschossfläche zur Fläche der Bodenplatte, die Baukonstruktion erdberührter Bauteile oder die Regenerationszeiten des Erdreichs Einfluss auf die Leistung einer Kühlung über die Sohlplatte. Welche Konsequenzen sich daraus im Detail für die Planung ergeben, ist nicht hinreichend erforscht.

Ein Bestandteil der vorliegenden Dissertation ist es daher, die Einflussfaktoren bei dem Einsatz passiver Kühlsysteme zu benennen und zu quantifizieren. Dafür werden zunächst die Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen Systeme aufgezeigt. In einem weiteren Schritt wird eines der Systeme für eine vertiefende Untersuchung herangezogen und im Rahmen einer Parameterstudie mithilfe einer

Simulationsumgebung bewertet. Bei dem System handelt es sich um die Sohlplattenkühlung, da diese durch ihre Einfachheit in der Umsetzung gegenüber anderen Systemen hervorsticht und die Potenziale des Systems noch nicht hinreichend untersucht sind. Die Parameterstudie erfolgt anhand thermisch-dynamischer Gebäudesimulationen, welche auf Basis der Randbedingungen gemäß [DIN 4108-2:2013-02] durchgeführt und ausgewertet werden. Mit den Übertemperaturgradstunden liegt eine aussagekräftige Größe vor, die eine Bewertung des sommerlichen Wärmeverhaltens und eine Identifikation derjenigen Parameter, welche einen hohen Einfluss auf die Raumtemperaturen ausüben, zulässt. Auch eine Untersuchung der thermischen Behaglichkeit nach [DIN EN 15251:2012-12] wird vorgenommen. Eine Berechnung zur Ausweisung des Hilfsenergiebedarfs und der Arbeitszahlen hilft darüber hinaus, den Aufwand und Nutzen der Sohlplattenkühlung zu bewerten.

Die Ergebnisse der Untersuchung münden in einer Formulierung von Planungsempfehlungen, um Planern eine Hilfestellung bei der Einschätzung der Potenziale passiver Kühlung, insbesondere der Sohlplattenkühlung, und Hinweise für die Umsetzung zu geben. Ziel ist es dabei, eine möglichst hohe Minderung der Raumtemperaturen, verbunden mit einem niedrigen Energiebedarf des Kühlsystems zu erreichen.

Zusammenfassend werden folgende Fragestellungen behandelt:

- Welche Systeme zur Kühlung von Gebäuden gelten als passiv?
- Wo liegen die baulichen und leistungstechnischen Grenzen der passiven Kühlung?
- Welche Faktoren beeinflussen die Effizienz passiver Kühlsysteme besonders?
- Welche Defizite bestehen bei der Planung passiver Kühlsysteme und wo liegen die Ursachen?
- Welche Systeme haben ein hohes Potenzial zur Verminderung der sommerlichen Raumtemperaturen und zur Einhaltung der Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz?
- Was ist bei der Planung zu beachten und wie lassen sich die Planungsgrundlagen verbessern?

1.2 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit erfolgt in Kapitel 2 eine Darstellung des Stands der Wissenschaft und Technik zur Bewertung des sommerlichen Wärmeverhaltens von Gebäuden und zu Systemen der passiven Kühlung. Hierbei ist zunächst die Beschreibung der normativen Grundlagen erforderlich. Die Normen DIN 4108-2 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“, welche die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz formuliert, sowie DIN EN 15251 „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik“, welche das Thema des thermischen Komforts in Gebäuden behandelt, sind die zwei wesentlichen für die Bewertung des Wärmeverhaltens im Sommer erforderlichen Normen. Im Anschluss an eine Beschreibung der Bewertungsverfahren, die den genannten Normen zugrunde liegen, wird eine sinnvolle Definition der passiven Kühlung anhand verschiedener Literaturquellen vorgenommen. Die dieser Definition zugehörigen passiven Kühlsysteme werden in ihrer Funktionsweise beschrieben, wobei eine Unterteilung nach möglichen Übergabesystemen, welche luft- oder wassergeführt sein können, sowie möglichen Wärmesenken erfolgt. Aufbauend auf diesen Grundlagen folgt eine Beschreibung der bislang bekannten Möglichkeiten und Grenzen passiver Kühlsysteme.

Kapitel 3 beschreibt die verwendete Simulationsumgebung und den Modellaufbau für die Parameterstudie. Als Simulationsumgebung kommt TRNSYS zum Einsatz. Zunächst wird eine Plausibilitätsprüfung mithilfe von Simulationsergebnissen aus einer zweiten Software durchgeführt, um das Risiko einer Verfälschung der Ergebnisse zu minimieren. Die Plausibilitätsprüfung erfolgt anhand eines einfachen Raummodells. Auf Basis der Literaturrecherche und des sich daraus ergebenden Forschungsbedarfs werden ein sinnvolles Gebäudemodell sowie ein passives Kühlsystem ausgewählt, welches im Rahmen einer Parameterstudie umfassend untersucht wird. Als Gebäudemodell dient ein kleines Mehrfamilienhaus. Bei dem ausgewählten Kühlsystem handelt es sich um eine Bauteilaktivierung mit Kühlung über die Sohlplatte. Im Rahmen einer Untersuchung der sogenannten Sohlplattenkühlung ist es von Interesse, die Temperaturen über mehrere Jahre zu simulieren, um Aussagen zu Temperaturveränderungen im Erdreich und zu deren Einfluss auf die Anlageneffizienz treffen zu können. Eine Herausforderung ist dabei die Abbildung des Erdreichs. Da es bei der Verwendung der Software TRNSYS verschiedene Möglichkeiten gibt, eine Sohlplattenkühlung abzubilden, werden mehrere Varianten des Modellaufbaus untersucht und diskutiert. Auf dieser Basis

erfolgt die Auswahl einer sinnvollen Methode für die Parameterstudie und die Festlegung der zu variierenden Simulationsparameter. Dies sind unter anderem die Parameter Sonnenschutz, Luftwechsel, Bauart, Klimarandbedingungen, Erdreich-eigenschaften sowie anlagentechnische Parameter wie der Massenstrom und die Rohreigenschaften. Die Bestimmung eines Basisfalls dient der Gegenüberstellung der Parametervariationen.

Anschließend an die Darstellung des Modellaufbaus erfolgt in Kapitel 4 die Auswertung der Simulationsergebnisse hinsichtlich der resultierenden Über-temperaturgradstunden nach [DIN 4108-2:2013-02]. Diese werden in Abhängigkeit des Abminderungsfaktors des Sonnenschutzes F_c für alle betrachteten Parameter dargestellt. Eine Bewertung der Parametervariationen hinsichtlich des thermischen Komforts nach [DIN EN 15251:2012-12] wird in Kapitel 5 vorgenommen. Hierbei erfolgt sowohl eine Auswertung nach dem adaptiven Komfortmodell als auch dem PMV-Modell. Die Betrachtung beider Modelle soll zeigen, ob die Sohlplattenkühlung trotz begrenzter Kühlleistung die Komfortkriterien des strengeren PMV-Modells oder lediglich die Kriterien des adaptiven Verfahrens erfüllen kann. Das adaptive Modell gilt genau genommen nur für Gebäude ohne maschinelle Kühlung. Die Ergebnisse werden für ausgewählte Fälle gegenübergestellt.

Kapitel 6 beinhaltet eine Auswertung des Hilfsenergiebedarfs und der Arbeitszahlen für ausgewählte Parametervariationen des Kühlsystems. Der Hilfsenergiebedarf ergibt sich anhand der elektrischen Leistungsaufnahme und der Laufzeit der Umwälzpumpe, welche aus der Simulation resultiert. Die Berechnung der Arbeitszahlen erfolgt anschließend anhand des Hilfsenergiebedarfs und der Wärmeaufnahme des Erdreichs.

Im Rahmen des vereinfachten Nachweisverfahrens zum sommerlichen Wärmeschutz nach [DIN 4108-2:2013-02] ist eine Anrechnung der passiven Kühlung zulässig. Um die Übereinstimmung des erforderlichen Sonnenschutzes bei Durchführung des vereinfachten Verfahrens und des detaillierten Verfahrens mittels Simulationen zu untersuchen, erfolgt in Kapitel 7 eine Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Verfahren.

Die gewonnenen Erkenntnisse münden in einer Zusammenstellung von Planungsempfehlungen mit dem Ziel, einen sinnvollen Einsatz des untersuchten Kühlsystems zu gewährleisten (Kapitel 8). Dabei erfolgt eine Betrachtung der wesentlichen Gewerke und Randparameter, die mit einer deutlichen Veränderung der sommerlichen Raumtemperaturen und des Energiebedarfs im Zusammenhang mit der Sohlplattenkühlung einhergehen. Ergänzend dazu werden Empfehlungen

für die zu wählende Nachweismethodik des sommerlichen Wärmeschutzes nach [DIN 4108-2:2013-02] ausgearbeitet. Hintergrund ist, dass der normative Nachweis entweder anhand des vereinfachten Sonneneintragskennwerte-Verfahrens oder anhand des detaillierten Verfahrens über Simulationen erfolgen kann. Die Ausführungen in diesem Kapitel erläutern, unter welchen Voraussetzungen welches Nachweisverfahren zweckdienlich ist. Für den Fall, dass eine Durchführung von Simulationen erfolgt, werden zudem Hilfestellungen für die Wahl der Software und der Randbedingungen dokumentiert.

Im abschließenden Kapitel 9 werden die wichtigsten Ergebnisse der Dissertation zusammengefasst. Der weiterhin erforderliche Forschungsbedarf wird hierbei aufgezeigt und Empfehlungen für dessen Umsetzung ausformuliert.

1.3 Motivation

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass die Potenziale passiver Kühlsysteme häufig nicht ausgeschöpft werden. Der Nutzen weist eine hohe Abhängigkeit von der Qualität der Planung und Auslegung auf, welche jedoch vielfach mit Fehlern verbunden sind.

Bei einer Analyse der Universität Kassel wurden verschiedene einem Monitoring unterzogene Gebäude, ausgestattet mit Systemen zur Nutzung des Erdreichs als Wärmequelle bzw. -senke, verglichen. Die Analyse zeigte unter anderem, dass Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Systeme maßgeblich von der Auslegung der Anlagen und einer integralen Planung abhängen und somit stark variieren. Es mangelte mehrfach an einer korrekten Dimensionierung [Radermacher und Maas 2013]. Diese Ergebnisse bestärken die Aussage, dass die Planungsempfehlungen geothermischer Systeme Defizite aufweisen. Ohne im Voraus thermische Gebäude- und Anlagensimulationen durchzuführen, scheint eine korrekte Dimensionierung von Anlagen, die der passiven Kühlung dienen, eine schwer zu bewältigende Aufgabe zu sein.

Andere Untersuchungen kamen in Bezug auf Erdwärmesysteme zu folgenden Aussagen bzw. Ergebnissen:

Ein „hoher qualitativer Standard bei der Planung und Ausführung sowie ein fehlerfreier, an die klimatischen Randbedingungen und die Nutzung angepasster Betrieb“ werden in [Bockelmann et al. 2010] als Voraussetzung für eine dauerhafte Funktionalität von Erdwärmesystemen hervorgehoben. Die sorgfältige detaillierte Planung stellt eine besondere Herausforderung dar, „Probleme und Fehler in den Anlagen werden häufig erst viel später (...) erkannt“.

Weiterhin kann eine falsche Dimensionierung von Erdwärmesystemen schwerwiegende Auswirkungen auf die Effizienz haben, vor allem bei einer Unterdimensionierung. Kurze Leitungslängen oder geringe Fördermengen führen zu ineffizientem Anlagenbetrieb und ggf. zu einer Überwärmung des Erdreichs und damit zu einem geringen Kälteentzug. Ursachen für eine ungünstige Dimensionierung können nach [Bockelmann et al. 2010] falsche Annahmen oder allgemein Fehler in den Berechnungen sowie das Außerachtlassen benachbarter Anlagen sein. Ebenso kann eine ungenügende Voruntersuchung des Erdreichs Probleme hervorrufen, dazu zählt beispielsweise die Einschätzung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperatur des Erdreichs.

Zur optimierten Auslegung von Luft-Erdwärmeübertragern wurden in [Dibowski 2003] einige Regeln entwickelt. Es existierten bislang „erhebliche Schwierigkeiten bei der Bestimmung des Leistungsvermögens und der Ertragsaussichten“ von Luft-Erdwärmeübertragern. Ein Normierungsprozess gestaltet sich aufgrund der unterschiedlichen Einsatzweisen, Auslegungsparameter und Bauformen als schwierig [Dibowski et al. 2004b, 3]. Inzwischen ist die Auslegung anhand der Richtlinie VDI 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes – Blatt 4: Direkte Nutzungen“ [VDI 4640-4:2004-09] erleichtert.

Auch bei dem Einsatz einer Bauteilaktivierung ist die sorgfältige Planung sehr wichtig. Einmal eingebaut, können Fehler „im späteren Gebäudebetrieb nur durch Nachinstallation eines Zusatzsystems, längere Betriebszeiten oder die aktive Konditionierung der Zuluft“ korrigiert werden [Pfafferott et al. 2015, 14]. Als Ursachen werden u. a. ungenügende Annahmen zum Kühlbedarf genannt.

[Pfafferot 2003] hebt hervor, dass Gebäudekonzepte zur passiven Kühlung „eine komplexe, ganzheitliche Denkweise im Zusammenspiel der unterschiedlichen Gewerke am Bau“ erfordern. Eine hohe Nutzungsqualität kann nur durch hohe Planungs- und Ausführungsqualität sichergestellt werden, da Auslegungsfehler nicht durch eine aktive Kühlung kompensiert werden können. Der korrekten Auslegung passiver Kühlsysteme im Zusammenspiel mit dem gesamten Gebäude kommt somit eine hohe Bedeutung zu.

Es wird deutlich, dass einige Systeme zur passiven Kühlung gängige Baupraxis sind. Es fehlt jedoch an konkreten Planungsgrundlagen, unter welchen baulichen, klimatischen, geologischen und nutzungstechnischen Randbedingungen die Systeme Nutzen bringen und wie diese am sinnvollsten auszulegen sind, um die Potenziale der passiven Kühlung auszuschöpfen. In der Literatur, z. B. in [Zimmermann 2003], sind bereits Entscheidungskriterien für die Systemwahl zu

finden. Dies kann während der Entwurfs- und Planungsphase eines Gebäudes ein hilfreiches Instrument der Entscheidungsfindung sein. Doch im weiteren Planungsverlauf fehlt es an Hilfestellungen bzgl. der standort- und gebäude-spezifischen Dimensionierung von Anlagen.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Normative Grundlagen

2.1.1 Sommerlicher Wärmeschutz von Gebäuden

Die [DIN 4108-2:2013-02] formuliert Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz und verfolgt das Ziel, durch bauliche Maßnahmen weitgehend sicherzustellen, dass keine unzumutbar hohen Innentemperaturen entstehen. Der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes ist im Rahmen eines energie-sparrechtlichen Nachweises nach Energieeinsparverordnung durch den Planer eines Gebäudes im Zuge der Bauantragserstellung zu erbringen [EnEV2014]. Er ist dabei mindestens für den Raum zu führen, der im Rahmen des Anwendungsbereichs zu den höchsten Anforderungen führt.

Die im Jahr 2013 novellierte Norm sieht zwei verschiedene Nachweisverfahren des sommerlichen Wärmeschutzes vor. Zum einen wurde das vereinfachte Sonneneintragskennwerte-Verfahren modifiziert, das dem Anwender mit geringem Aufwand ermöglicht, für den kritischen Raum eines Gebäudes den Nachweis zu führen bzw. den erforderlichen Sonnenschutz zu ermitteln. Dabei ist nachzuweisen, dass der vorhandene Sonneneintragskennwert den zulässigen nicht überschreitet: $S_{\text{vorh}} \leq S_{\text{zul}}$. Der vorhandene Sonneneintragskennwert ist nach folgender Gleichung zu ermitteln:

$$S_{\text{vorh}} = \frac{\sum_j A_{w,j} \cdot g_{\text{tot},j}}{A_G} \quad (2-1)$$

mit A_w [m²] die Fensterfläche

g_{tot} [-] der Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases einschließlich Sonnenschutz, vereinfacht berechnet nach:

$$g_{\text{tot}} = g \cdot F_c$$

g [-] Gesamtenergiedurchlassgrad des Glases für senkrechten Strahlungseinfall

F_c [-] Abminderungsfaktor für Sonnenschutzvorrichtungen

nach [DIN 4108-2:2013-02], Tabelle 7

A_G [m²] die Nettogrundfläche des Raumes oder Raumbereichs

Der maximal zulässige Sonneneintragskennwert S_{zul} wird durch Aufsummierung sechs anteiliger Sonneneintragskennwerte S_x gebildet, welche gemäß

[DIN 4108-2:2013-02], Tabelle 8 zu bestimmen sind. Er ergibt sich somit aus folgender Gleichung:

$$S_{\text{zul}} = \sum S_x \quad (2-2)$$

In den ersten anteiligen Sonneneintragskennwert fließen die Nutzung (Wohn- oder Nichtwohngebäude), die Klimaregion, die Bauart sowie die Nachtlüftung ein. Bei der Nachtlüftung wird zwischen nicht vorhandener, erhöhter oder hoher Nachtlüftung unterschieden. Weitere anteilige Sonneneintragskennwerte berücksichtigen den Fensterflächenanteil, die Verwendung von Sonnenschutzglas, die Fensterneigung und die Orientierung. Seit der novellierten Fassung von 2013 existiert außerdem ein Kennwert, der den Einsatz passiver Kühlung anrechnet. Dieser ist abhängig davon, ob eine leichte, mittlere oder schwere Bauart vorliegt. Für die Festlegung dieses Kennwertes wurden jedoch keine Berechnungen vorgenommen, wie aus [Schlitzberger 2014, 64] hervorgeht. Die Werte beruhen stattdessen auf einer qualifizierten Einschätzung basierend auf vorangegangenen Untersuchungen.

Zum anderen sieht die Norm die Möglichkeit des detaillierten Nachweises durch thermisch-dynamische Gebäudesimulation unter Anwendung vorgegebener Randbedingungen vor. Die Norm fordert dabei die Einhaltung eines Grenzwertes der Übertemperaturgradstunden. Diese geben die Summe der Differenzen zwischen den Stundenwerten der operativen Raumtemperatur und einer Grenz- bzw. Bezugstemperatur an, sofern die operative Temperatur diese überschreitet. Die Bezugstemperatur unterscheidet sich je nach vorliegender Klimaregion A, B oder C des Standortes in Deutschland und liegt bei 25, 26 oder 27 °C. Die Differenzen werden für das gesamte Jahr aufsummiert und ergeben damit die Übertemperaturgradstunden in Kh/a.

Im Gegensatz zur ehemaligen Anforderungsgröße der Überschreitungshäufigkeiten treffen die Übertemperaturgradstunden sowohl Aussagen zur Dauer als auch zur Höhe der Überschreitungen der Bezugstemperatur. Zur Beurteilung der sommerlichen Wärmebelastung sind sie daher gut geeignet. Bei dem Grenzwert der Übertemperaturgradstunden wird nach Wohn- und Nichtwohngebäuden unterschieden. Für Wohngebäude sind maximal 1200 Kh/a, für Nichtwohngebäude maximal 500 Kh/a zulässig.

Die im Rahmen der Arbeit ausgewerteten thermischen Gebäudesimulationen werden entsprechend der Randbedingungen nach [DIN 4108-2:2013-02] durchgeführt. Mithilfe von Parameterstudien werden die Übertemperaturgradstunden eines passiven Kühlsystems für verschiedene Fälle verglichen.

Bei den Parametern, die den sommerlichen Wärmeschutz im Wesentlichen bestimmen, handelt es sich um Sonnenschutz, Nutzungsart, Klimaregion, Bauart, Nachtlüftung, Fensterausführung sowie die passive Kühlung.

2.1.2 Bewertung des thermischen Komforts

Das thermische Gleichgewicht des menschlichen Körpers, welches das thermische Wohlbefinden des Menschen bestimmt, hängt neben körperlicher Betätigung und Bekleidung von den Parametern des Umgebungsklimas – Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte – ab. Mithilfe dieser Parameter kann das Wärmeempfinden des Körpers gemäß [DIN EN ISO 7730:2006-05] anhand der Bewertungskriterien PMV und PPD vorausgesagt werden. Der PMV-Index (predicted mean vote) stellt einen vorausgesagten Durchschnittswert für die Klimabeurteilung einer großen Personengruppe anhand einer siebenstufigen Skala von -3 bis +3 dar, wobei -3 kalt, 0 neutral und +3 heiß entspricht. Um auch die Anzahl der Personen voraussagen zu können, die das Umgebungsklima als zu warm oder zu kalt empfinden, wurde der Index PPD (predicted percentage of dissatisfied) eingeführt. Dieser gibt den vorausgesagten Prozentsatz der Personen an, die mit einem Umgebungsklima unzufrieden sind und dieses daher mit kalt, kühl, warm oder heiß bewerten. Es werden weiterhin drei Kategorien des Umgebungsklimas A, B und C festgelegt, die für die verschiedenen Bewertungskriterien Grenzen vorgeben.

Die [DIN EN 15251:2012-12] beinhaltet „Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden“. Sie unterscheidet grundsätzlich zwischen „Gebäuden ohne maschinelle Kühlung“ und „maschinell beheizte und/oder gekühlte Gebäude“. Die Bewertungsmethoden für maschinell beheizte und/oder gekühlte Gebäude beruhen im Wesentlichen auf den Kriterien für die thermische Behaglichkeit und die Raumluftqualität gemäß [DIN EN ISO 7730:2006-05]. Darüber hinaus legt sie jedoch Auslegungskriterien für die Anlagendimensionierung entsprechend dem PMV-Komfortmodell fest. Die [DIN EN 15251:2012-12] formuliert ebenfalls Kategorien des Innenraumklimas, die je nach Gebäudetyp, Nutzung und Klima ausgewählt und für eine Beurteilung des Innenraumklimas verwendet werden können. Neben einer Beurteilung des thermischen Raumklimas ist die Beurteilung auch für Raumluftqualität, Lüftungsraten, Luftfeuchte, Beleuchtung und Schall vorgesehen. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch allein das thermische Raumklima untersucht. Die Anwendbarkeitsbereiche der Kategorien sind in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Tabelle 2-1 Beschreibung der Anwendbarkeit der verwendeten Kategorien nach [DIN EN 15251:2012-12].

Kategorie	Beschreibung
I	Hohes Maß an Erwartungen; empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z. B. Personen mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen
II	Normales Maß an Erwartungen; empfohlen für neue und renovierte Gebäude
III	Annehmbares, moderates Maß an Erwartungen; kann bei bestehenden Gebäuden angewendet werden
IV	Werte außerhalb der oben genannten Kategorien. Diese Kategorie sollte nur für einen begrenzten Teil des Jahres angewendet werden

Im Gegensatz zur [DIN EN ISO 7730:2006-05] wird in der [DIN EN 15251:2012-12] auch berücksichtigt, dass die Erwartungen von Nutzern an natürlich belüftete Gebäude und an klimatisierte Gebäude voneinander abweichen können, weshalb für Gebäude ohne maschinelle Kühlung ein alternatives Bewertungsverfahren bereitgestellt wird. Dieses „adaptive Modell“ setzt eine Anpassung des Nutzers an steigende Temperaturen voraus, beispielsweise durch Fensterlüftung, Nutzung des Sonnenschutzes oder Anpassung der Bekleidung. Daher werden auf einem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur θ_{rm} beruhende Kriterien für die Innentemperatur empfohlen:

Kategorie I oberer Grenzwert: $\theta_{i,max} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 2$

unterer Grenzwert: $\theta_{i,min} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 2$

Kategorie II oberer Grenzwert: $\theta_{i,max} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 3$

unterer Grenzwert: $\theta_{i,min} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 3$

Kategorie III oberer Grenzwert: $\theta_{i,max} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 4$

unterer Grenzwert: $\theta_{i,min} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 4$

mit

$\theta_{i,max}$ [°C] der obere Grenzwert der operativen Innentemperatur

$\theta_{i,min}$ [°C] der untere Grenzwert der operativen Innentemperatur

θ_{rm} [°C] der gleitende Mittelwert der Außentemperatur

Die Grenzwerte sind in Bild 2-1 grafisch dargestellt, wobei in der vorliegenden Arbeit lediglich die Überschreitungen der oberen Grenzwerte von Bedeutung sind.

Die oberen Grenzwerte gelten nur für einen Temperaturbereich des gleitenden Mittelwerts der Außentemperatur von 10 bis 30 °C und die unteren Grenzwerte von 15 bis 30 °C. Unterhalb dieser Temperaturen ($\theta_{rm} < 10$ °C bzw. < 15 °C) sind die für maschinell gekühlte Gebäude empfohlenen Werte anzuwenden.

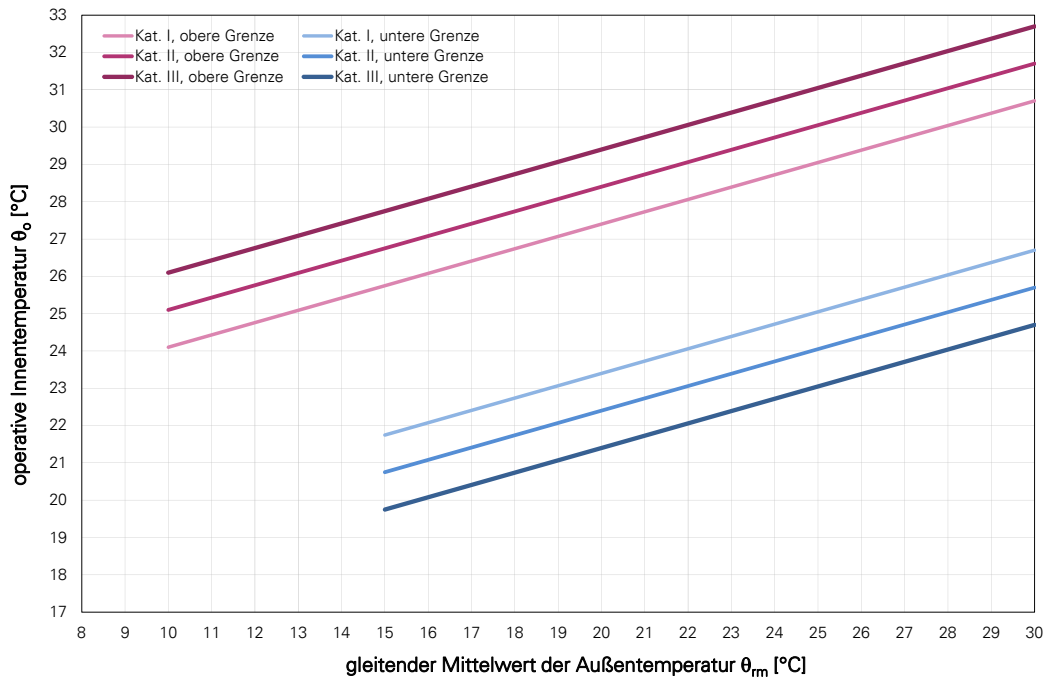


Bild 2-1 Auslegungswerte für die operative Innentemperatur von Gebäuden ohne maschinelle Kühlanlage, dargestellt als Funktion des exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur nach [DIN EN 15251:2012-12].

Für maschinelle beheizte/gekühlte Gebäude werden den vier Kategorien des Innenraumklimas in [DIN EN 15251:2012-12] unterschiedliche Bandbreiten des PMV- und des PPD-Votums zugeordnet. So werden beispielsweise für ein maschinell geheiztes und gekühltes Gebäude nach Kategorie II ein PMV-Index zwischen -0,5 und +0,5 und ein PPD-Index von unter 10 % empfohlen. Die weiteren Kategorien sind Tabelle 2-2 zu entnehmen.

Tabelle 2-2 Beispiele empfohlener Kategorien für die Auslegung maschinell geheizter und gekühlter Gebäude nach [DIN EN 15251:2012-12].

Kategorie	Thermischer Zustand des Körpers insgesamt	
	Percentage of dissatisfied (PPD) [%]	Vorausgesagtes mittleres Votum (PMV) [-]
I	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	> 15	PMV < -0,7 oder +0,7 < PMV

Darüber hinaus werden jeweils für Kategorie I, II und III empfohlene Auslegungswerte der Innenraumtemperatur für die Auslegung von maschinell geheizten und gekühlten Gebäuden angegeben, welche eine Einhaltung der angegebenen PMV-Bandbreiten zum Ziel haben. Die Auslegungswerte für das im Folgenden als „PMV-Modell“ bezeichnete Bewertungsverfahren lauten auszugsweise für die Wohn- und die Büronutzung:

Kategorie I	oberer Grenzwert (Kühlung):	$\theta_{i,max} = 25,5 \text{ °C}$
	unterer Grenzwert (Heizung):	$\theta_{i,min} = 21 \text{ °C}$
Kategorie II	oberer Grenzwert (Kühlung):	$\theta_{i,max} = 26 \text{ °C}$
	unterer Grenzwert (Heizung):	$\theta_{i,min} = 20 \text{ °C}$
Kategorie III	oberer Grenzwert (Kühlung):	$\theta_{i,max} = 27 \text{ °C}$
	unterer Grenzwert (Heizung):	$\theta_{i,min} = 19 \text{ °C}/18 \text{ °C}$
		(Büronutzung/Wohnnutzung)

Zur Ganzjahresauswertung der thermischen Behaglichkeit nach dem PMV-Modell können die Temperaturbereiche gemäß [DIN EN 15251:2012-12], Tabelle A.3 verwendet werden. Diese sind in Bild 2-2 und Bild 2-3 über dem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur für die Wohn- und Büronutzung dargestellt.

Da in der Norm keine klare Abgrenzung zwischen Heiz- und Kühlperiode erfolgt, wurde hier ein gleitender Übergangsbereich zwischen 12 und 18 °C in Anlehnung an [Pfafferott et al. 2015, 48] verwendet. Um einen direkten Vergleich der Temperaturbereiche mit dem adaptiven Modell herzustellen, sind diese zusätzlich grau hinterlegt. Die empfohlenen Temperaturbereiche für den Heizbetrieb von Wohngebäuden (linker Grafikbereich) sind gegenüber Bürogebäuden etwas vereinfacht und hinsichtlich der Anforderungen geringer, die Temperaturgrenzen für die Kühlperiode (rechter Grafikbereich) sind jedoch identisch.

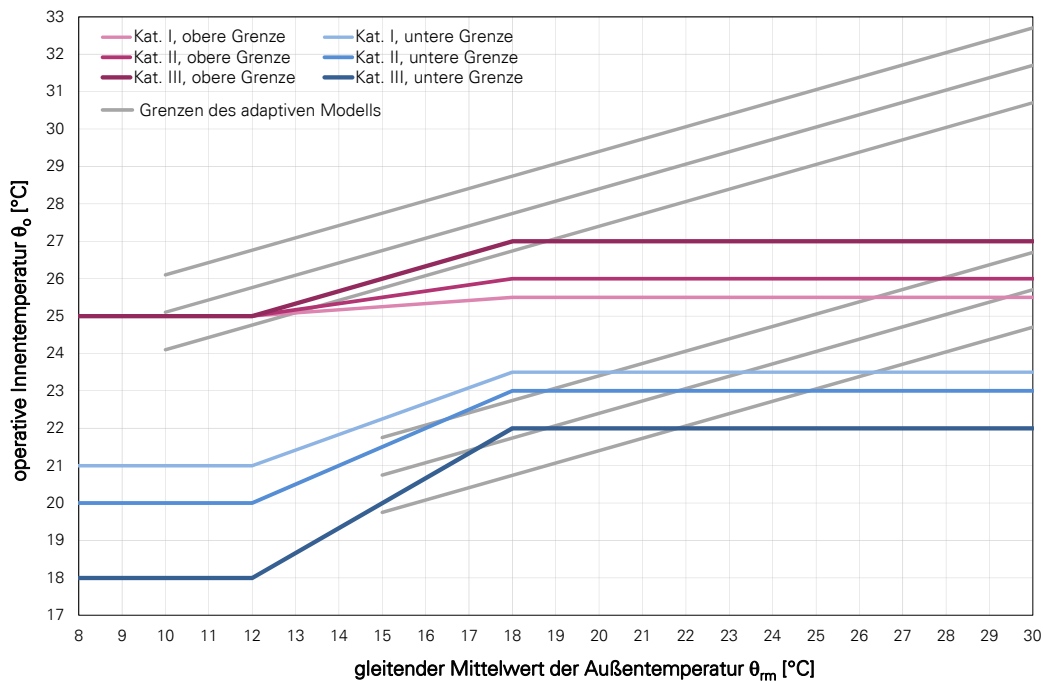


Bild 2-2 Empfohlene Temperaturbereiche für die operative Innentemperatur von Gebäuden mit maschineller Kühlung, nach [DIN EN 15251:2012-12] und [Pfafferott et al. 2015, 48], hier dargestellt für die Wohnnutzung. Zum Vergleich sind die Grenzen für Gebäude ohne maschinelle Kühlung in grau zu sehen.

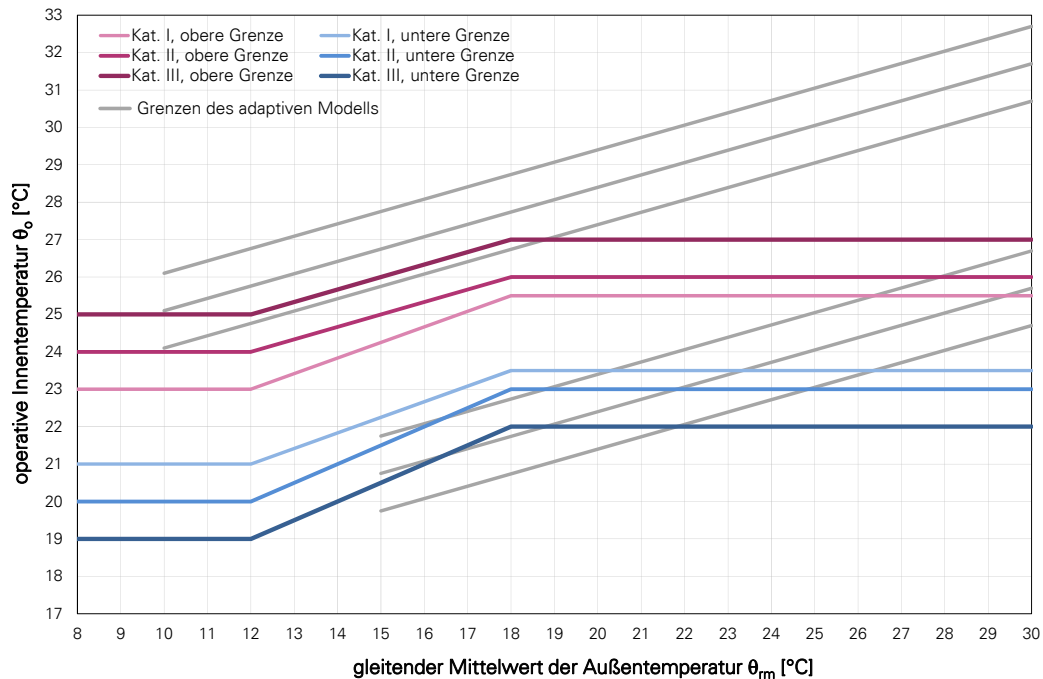


Bild 2-3 Empfohlene Temperaturbereiche für die operative Innentemperatur von Gebäuden mit maschineller Kühlung, nach [DIN EN 15251:2012-12] und [Pfafferott et al. 2015, 48], hier dargestellt für die Büronutzung. Zum Vergleich sind die Grenzen für Gebäude ohne maschinelle Kühlung in grau zu sehen.

Empfohlene Kriterien für zulässige Abweichungen werden in Anhang G der [DIN EN 15251:2012-12] formuliert. Danach sind Überschreitungen der Grenzen der jeweiligen Kategorie an bis zu 3 % (oder 5 %) der Nutzungszeit zulässig.

Bei Vorhandensein einer passiven Kühlung stellt sich die Frage, ob diese als maschinelle Kühlung einzuordnen ist und somit das PMV-Modell statt des adaptiven Modells zur Bewertung des thermischen Komforts herangezogen werden muss. Die [DIN EN 15251:2012-12] beinhaltet dazu folgende Zuordnung:

Gebäude ohne maschinelle Kühlung sind gemäß [DIN EN 15251:2012-12] definiert als „Gebäude, die nicht über maschinelle Kühlung verfügen und bei denen zur Senkung hoher Innentemperaturen in der warmen Jahreszeit auf andere Verfahren zurückgegriffen wird, wie z. B. nicht zu große Fenster, angemessene Abschirmung gegen Sonneneinstrahlung, Verwendung der Gebäudemasse, freie Lüftung, nächtliche Lüftung usw. zur Verhinderung der Überhitzung“. Als maschinelle Kühlung gilt hingegen eine „Kühlung eines Raums oder eines Gebäudes mit maschinellen Hilfsmitteln zur Kühlung der Zuluft durch z. B. Ventilator-konvektoren, gekühlte Oberflächen usw. Anmerkung: Die Definition steht in Zusammenhang mit den von den Nutzern erwarteten Innentemperaturen während der warmen Jahreszeit. Das Öffnen von Fenstern am Tag und in der Nacht gilt nicht als maschinelle Kühlung. Als maschinelle Kühlung gilt hingegen jede maschinell unterstützte Lüftung (Ventilatoren).“

Demnach gilt ein Gebäude mit passiver Kühlung wie z. B. einer Lüftungsanlage oder Bauteilaktivierung als maschinell gekühltes Gebäude und muss streng genommen nach dem PMV-Modell bewertet werden. Da eine passive Kühlung jedoch keine festen Innentemperatur-Sollwerte gemäß PMV-Modell gewährleisten kann, ist zu überprüfen, ob dennoch ein Einhalten der Komfortkriterien des PMV-Modells möglich ist.

Eine Neudefinition von fünf Gebäudekategorien für die [DIN EN 15251:2012-12] anstelle der Unterscheidung in „Gebäude ohne maschinelle Kühlung“ und „maschinell beheizte und/oder gekühlte Gebäude“ wird bereits in [Kalz 2009, 117f] vorgeschlagen. Hierbei wird zwischen verschiedenen Kühlsystemen unterschieden und diesen individuelle Anforderungen an den Komfort zugewiesen. Im Rahmen der Novellierung der Norm im Jahr 2012 wurde die Kategorisierung jedoch nicht verändert.

Die Fassung der [DIN EN 15251:2012-12] aus dem Jahre 2012 wurde gegenüber [DIN EN 15251:2007-08] um einen nationalen Anhang ergänzt. Hier werden abweichende Festlegungen hinsichtlich der empfohlenen Kriterien zur Einhaltung der Kategorie II getroffen. Nach [Schlitzberger 2014] führt die Zugrundelegung des nationalen Anhangs gegenüber dem beschriebenen 3 %-Kriterium jedoch zu derart hohen Anforderungen, dass selbst in Standardsituationen eine Einhaltung der Kategorie II nur durch unverhältnismäßige Maßnahmen möglich ist. Daher kommt der nationale Anhang in der vorliegenden Arbeit nicht zur Anwendung.

2.2 Begriffsdefinition passive Kühlung

Eine eindeutige Begriffsdefinition der passiven Kühlung stellt sich als schwierig dar. Sie umfasst beispielsweise nach [Zimmermann 2003] genau genommen lediglich bauliche Maßnahmen, die ohne jegliche Energieaufwendungen zur Kühlung von Gebäuden beitragen. Hier ist vor allem die natürliche Lüftung, insbesondere mit der Möglichkeit einer Nachtlüftung, zu nennen. Nach [Zimmermann 2003] können unter der rein passiven Kühlung auch eine Beschattung sowie Maßnahmen zur Verbesserung des Mikroklimas verstanden werden. In anderer Literatur wird lediglich die freie Kühlung mit Nachtlüftung als passive Kühlung aufgeführt, Energieaufwand für die Luftförderung somit eingeschlossen [Ihle 2006].

Im Sinne einer erweiterten Definition nach [DIN 4108-2:2013-02] kann auch von passiver Kühlung „ausgegangen werden, wenn zur Raumkühlung Systeme eingesetzt werden, bei denen Energie ausschließlich zur Förderung des Kühlmediums erforderlich ist. Vorausgesetzt wird eine fallspezifische Auslegung des Systems, in der Regel thermisch aktivierte Bauteile mit Nutzung eines

Sohlplattenkühlers oder Erdwärmetauschers (geothermische Kühlung, kein bivalenter Betrieb mit Kältemaschinen) oder Systeme mit Kühlung über indirekte Verdunstung (monovalente Betriebsweise).“

Zur passiven Kühlung können dieser Definition entsprechend die natürliche und die mechanische Tag- und Nachtlüftung, die thermische Bauteilaktivierung, wobei sowohl Außenluft als auch Erdreich als Wärmesenke dienen können, die adiabate Kühlung (Verdunstungskühlung) sowie die freie Kühlung über einen Kühlturm (Rückkühlwerk) gezählt werden. Systeme, die mit Kältemaschinen arbeiten, sind davon abzugrenzen. Diese fallen unter den Begriff der aktiven Kühlung. Die passive Kühlung bedient sich somit sowohl natürlicher Gegebenheiten vor Ort als auch intelligenter technischer Lösungen, um die Behaglichkeit in Gebäuden zu steigern. Bei der Entscheidung für ein passives Kühlkonzept ist zu beachten, dass es kein definiertes Temperaturniveau sicherstellen kann. Es ist jedoch in der Lage, die Raumlufttemperatur auf ein moderates Niveau zu senken.

Die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit beziehen sich auf die erweiterte Definition gemäß [DIN 4108-2:2013-02], insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Simulationen auf den Randbedingungen dieser Norm basieren und die Einhaltung der Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz einen wesentlichen Aspekt der Arbeit darstellt.

Die bauliche Ausführung von Gebäuden wird somit im Rahmen der Arbeit nicht in die Begriffsdefinition der passiven Kühlung einbezogen, stellt aber eine bedeutende Einflussgröße dar. Zudem erhöht eine Optimierung der baulichen Randbedingungen die Wirksamkeit einer Lüftung oder einer Bauteilaktivierung. Um deren Kühlfunktion bestmöglich zu nutzen, bedarf es erhöhter Wärmespeichermassen sowie minimierter interner und externer Wärmelasten. Nur so kann die Wärme tagsüber gespeichert und nachts abgeführt werden. Architektonische Aspekte spielen ebenfalls eine große Rolle, wie z. B. eine außenliegende Sonnenschutzvorrichtung, eine günstige Fensteranordnung, die Gebäudeausrichtung und -form oder die Nutzung des thermischen Auftriebs durch Atrien, Treppenhäuser oder Schächte.

Auch das Gebäudeumfeld kann auf die Raumtemperaturen einwirken, da unterschiedliche Oberflächen und Baukörper sich auf das Mikroklima auswirken. So kann der sommerliche Wärmeschutz durch Bepflanzungen, die Erhöhung der Reflektion oder eine städtebaulich günstige Planung (falls möglich) verbessert werden, wie umfangreich in [Katzschner et al. 2009], [Schneider und Maas 2010]

und [Schneider 2012] untersucht wurde. Diese Faktoren werden in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher betrachtet.

Im Folgenden werden die Möglichkeiten der passiven Kühlung im Sinne der verwendeten Definition erläutert. Neben einer Beschreibung der Übergabesysteme und möglichen Wärmesenken werden auch Voraussetzungen, Planungshinweise und Leistungsvermögen aufgezeigt.

2.3 Übergabesysteme zur passiven Kühlung

2.3.1 Luftgeführte Systeme

Die natürliche Lüftung, beispielsweise über Fenster, Außenwanddurchlässe und Oberlichter, stellt die am häufigsten eingesetzte Art der Lüftung von Gebäuden dar. Oft kommt auch eine mechanische Lüftung, welche durch mechanische Antriebe einen kontrollierten Luftwechsel schafft, zum Einsatz oder eine Kombination von natürlicher und mechanischer Lüftung.

Bei der natürlichen Lüftung über geöffnete Fenster sind hohe Luftwechsel über 10 h^{-1} möglich, eine sinnvolle Anordnung der Fenster vorausgesetzt [Zimmermann 2003]. Andererseits haben die Wetterverhältnisse sowie das Nutzerverhalten einen erheblichen Einfluss auf die Effektivität der Lüftung ohne mechanische Antriebe. Ein gefühlsabhängiges Lüften führt häufig zu einem erhöhten Eintrag von Wärmelasten, da beispielsweise die Außenluft durch die Luftbewegung bei hohen Luftwechseln kühler empfunden wird. Zudem können die Gebäudesicherheit und der Witterungsschutz insbesondere bei Bürogebäuden der natürlichen Nachtlüftung im Wege stehen.

Bei der mechanischen Lüftung hingegen ist der Luftwechsel auf kleinere Werte begrenzt, da der Hilfsenergiebedarf bei Luftwechseln $> 4 \text{ h}^{-1}$ gemäß [Zimmermann 2003] ein wirtschaftlich sinnvolles Maß überschreitet. Argumente für die mechanische Lüftung können die geringeren Wärmeverluste im Winter sein sowie die mögliche Kombination mit einem passiven Kühlsystem (z. B. Luft-Erdwärmeübertrager) oder die Ausführung als adiabate (passive) Kühlung.

Erfahrungen mit einer Kombination von natürlicher und mechanischer Lüftung wurden beispielsweise durch das Monitoring an einem Bürogebäude in Weilheim gewonnen. Hier erzeugt die mechanische Lüftung konstant einen notwendigen Luftwechsel von mindestens $1,3 \text{ h}^{-1}$ und die durch die Nutzer beeinflusste natürliche Lüftung einen Luftwechsel von bis zu 8 h^{-1} [Pfafferot 2002, 5].

Ein Vorteil luftgeführter Systeme gegenüber wassergeführter ist, dass die ohnehin erforderliche Frischluftmenge genutzt werden kann, um die Temperatur des Raums zu senken, ohne zusätzliche Kosten für den Transport des Kühlmediums zu verursachen. Zudem kann die Aktivierung thermischer Speichermassen durch eine natürliche Nachtlüftung die Kühlleistung verstärken.

Erfordert die Nutzung eines Gebäudes jedoch höhere Kühlleistungen als die Lüftung bereitstellen kann, sind wassergeführte Systeme zu bevorzugen bzw. hinzuzuziehen, da der Hilfsenergiebedarf wie bereits erwähnt bei hohen Luftwechsell zu hoch ist. Der Primärenergieeinsatz für den Transport des Kühlmediums durch ein Lüftungssystem übersteigt bezogen auf 1 kW Kühlleistung den Einsatz gegenüber einem wassergeführten System um etwa das 30-fache [Blümel et al. 2002, 17]. Gründe sind die höhere spezifische Wärmekapazität und die höhere Dichte von Wasser gegenüber Luft. Die erforderlichen hohen Luftmengen bringen auch größere Kanaldimensionen mit sich, was zusätzlich die Investitionskosten in die Höhe treiben kann.

Als Wärmesenke für luftgeführte Systeme können einerseits kühle Außenlufttemperaturen oder Erdreichtemperaturen dienen und andererseits eine Befeuchtung der Zuluft mittels einer adiabaten Kühlung. Solche Systeme sind bei guter Planung in der Lage, hohe Kühlleistungen zu erzielen.

2.3.2 Wassergeführte Systeme

Zu den wassergeführten Kühlsystemen zählt die Bauteilaktivierung, auch thermoaktive Bauteilsysteme (TABs) genannt. Dabei werden wasserführende Leitungen in Fußboden, Wände oder Decken integriert, um mithilfe der hohen Speichermassen die Wärme im Raum abzuführen und damit ein moderates Innenklima zu schaffen. Eine Sonderform ist die Betonkerntemperierung (BKT), bei der die Rohre mittig in der Betondecke verbaut werden. Das Prinzip ist, dass tagsüber die anfallenden Wärmemengen im massiven Bauteil eingelagert werden und abends/nachts zeitverzögert über das zirkulierende Wasser abtransportiert und der Wärmesenke zugeführt werden. Bei den Rohren handelt es sich meistens um Kunststoffrohre, bei eingeputzten Systemen werden häufig Kapillarrohrmatten verwendet [Pfafferott et al. 2015, 12]. Bild 2-4 zeigt verschiedene übliche Konstruktionsmöglichkeiten der Bauteilaktivierung. Weitere Varianten sind in [Wimmer 2004, 7] und [VDI 6034:2011-02] dokumentiert.

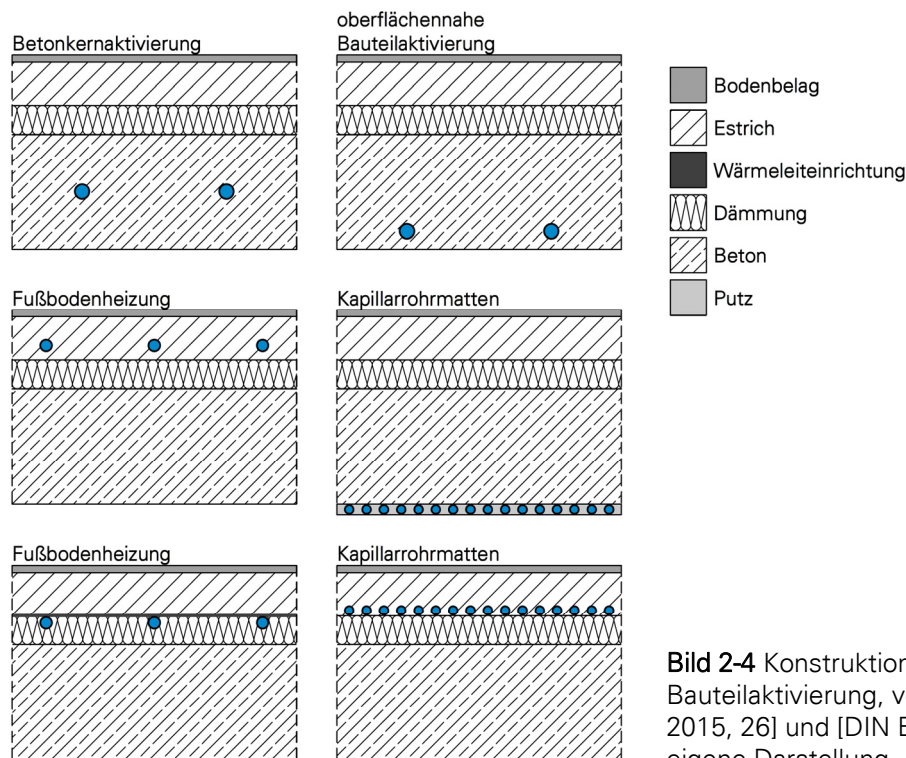


Bild 2-4 Konstruktionsmöglichkeiten der Bauteilaktivierung, vgl. [Pfafferott et al. 2015, 26] und [DIN EN 1264-1:2011-09], eigene Darstellung.

Eine Nutzung der Rohrregister zum Heizen ist ebenfalls sinnvoll, da Flächenheizungen effizient betrieben werden können und sie für eine behagliche ausgeglichene Wärmeverteilung im Raum sorgen. Vorteilhaft ist, dass die Wärmeübertragung bei der Bauteilaktivierung über eine große Fläche stattfindet. Dadurch können auch kleine Temperaturdifferenzen zwischen Wärmeträgerfluid und Raumluft genutzt werden. Zum Heizen sind somit nur verhältnismäßig niedrige und zum Kühlen verhältnismäßig hohe Vorlauftemperaturen (16 bis 22 °C [Pfafferott et al. 2015, 15]) nötig. Die Bauteilaktivierung bietet damit gute Voraussetzungen für eine passive Kühlung, da sie im Sommer als freie Kühlung mittels Rückkühlwerk oder Erdreich eingesetzt werden kann. Die im Estrich verlegten Rohre bieten den Vorteil, dass sie auch im Winter als Fußbodenheizung eingesetzt werden können.

Die Wirksamkeit solcher Systeme wurde z. B. in [Hauser und Kempkes 1998], [Hauser 2001] und [Hauser et al. 2004] untersucht. Ein Vergleich unterschiedlicher wasserdurchströmter Bauteile zur Kühlung von Holzhäusern in [Hauser 2001, 24] kommt zu der Empfehlung, „die für die Beheizung ausreichend praxiserprobte Fußbodenheizung auch für die Wärmeabfuhr - also Kühlung - im Sommer heranzuziehen“. In [Pfafferott et al. 2015] werden zudem Praxiserfahrungen und Ergebnisse aus Forschungsarbeiten zur Bauteilaktivierung zusammengetragen und daraus Anforderungen für einen erfolgreichen, energieeffizienten Betrieb

abgeleitet. Mögliche Kühlleistungen werden hier mit $50\text{-}70\text{ W/m}^2$ angegeben. Eine Untersuchung verschiedener Energiekonzepte in Kombination mit einer Bauteilaktivierung an 13 Beispielgebäuden mithilfe von Monitorings sowie eine Simulationsstudie zur Performance und zu verschiedenen Regelstrategien findet in [Kalz 2009] statt.

Das Prinzip einer Kühlung und Heizung mithilfe einer Bauteilaktivierung ist in Bild 2-5 verdeutlicht. Im abgebildeten Beispiel wird die Bauteilaktivierung im Heizbetrieb mit einer Sole-Wasser-Wärmepumpe und im Sommerbetrieb mit einer freien Kühlung über Erdwärmesonden kombiniert.

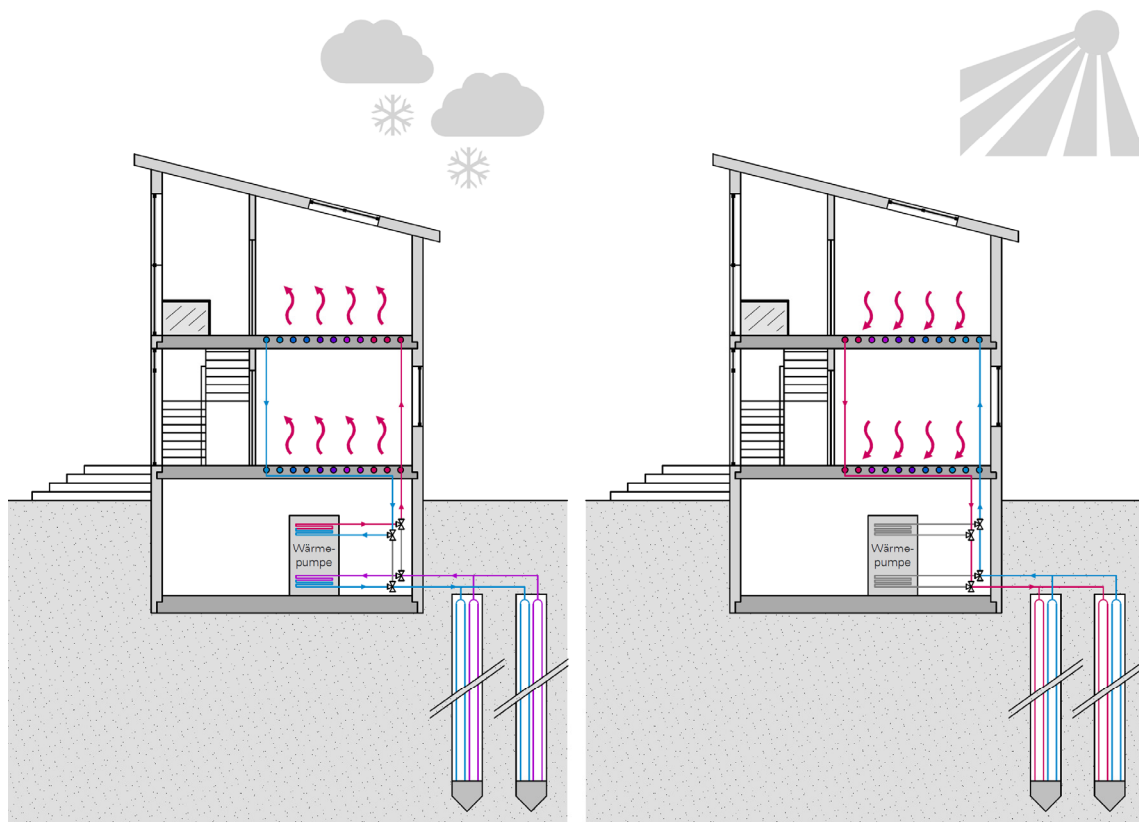


Bild 2-5 Prinzip der Bauteilaktivierung im Winter- und Sommerbetrieb bei Kombination mit einer Wärmepumpe und einer Kühlung über Erdwärmesonden.

2.3.3 Planungshinweise zur Bauteilaktivierung

Da die Vorlauftemperaturen einer Bauteilaktivierung im Kühlfall im Vergleich zu anderen Übergabesystemen relativ hoch sind und somit auch die Kühlleistung begrenzt ist, sollte in der Regel eine möglichst große Fläche im Raum thermisch aktiviert werden. Die Bauteilflächen sind jedoch aufgrund baulicher und räumlicher Gegebenheiten häufig nur eingeschränkt nutzbar, insbesondere bei Bürogebäuden. Reduktionen der Flächen werden verursacht durch ungünstige Anordnungen von Stützen, Elektroinstallationen und Lüftungsrohre, Verdeckung von Bauteilen durch abgehängte Decken oder große Schränke. Nach [Pfafferott et al. 2015, 87] sind

bestenfalls 70 – 80 % der Nettogrundfläche eines Raumes für die thermische Aktivierung nutzbar. Dieser Wert kann als Faustregel für den Planungsstart dienen. Eine frühzeitige integrale Planung, bei der gebäudetechnische Installationen und raumakustische Maßnahmen einbezogen werden, ist somit wichtig, um die Anteile der für die Bauteilaktivierung verfügbaren Deckenflächen zu maximieren [Pfafferott et al. 2015, 86f]. Werden die erwarteten Leistungen trotzdem nicht erreicht, kann dies ggf. durch eine modifizierte Betriebsführung kompensiert werden, wie beispielsweise durch eine Verlängerung der täglichen Laufzeiten des Systems. Es ist jedoch zu beachten, dass die Bauteilaktivierung nur über geringe Leistungsreserven über die Auslegung hinaus verfügt. Daher dürfen die Leistungsanforderungen an das System nicht höher als das Leistungsvermögen sein [Pfafferott et al. 2015, 88f].

Die minimale Vorlauftemperatur der Bauteilaktivierung wird im Kühlfall in der Regel durch die Taupunkttemperatur bestimmt, um eine Tauwasserbildung an den Bauteiloberflächen zu verhindern. Dazu wird die Vorlauftemperatur üblicherweise auf einen Wert von 18 °C begrenzt [Kalz 2009, 153]. Da bei der passiven Kühlung nur natürliche Wärmesenken in Betracht kommen, ist ein Unterschreiten der Taupunkttemperatur unwahrscheinlich. Dennoch sollte eine Unterschreitung überprüft und ggf. durch Regelstrategien unterbunden werden. Die Vorlauftemperatur ist auch unter Komfortaspekten von Interesse, da sich eine zu niedrige Oberflächentemperatur des Fußbodens negativ auf die thermische Behaglichkeit auswirken kann. [Günther o. J.] schlägt zur Erhöhung der thermischen Behaglichkeit eine minimal zulässige Oberflächentemperatur von 19 °C vor.

Bezüglich der Regelungsstrategie einer Bauteilaktivierung finden sich verschiedene Ansätze. In [Loose 2013, 140] werden drei Möglichkeiten beschrieben. Erstens besteht die Variante der unregulierten Vorlauftemperatur entsprechend der Wärmequelle/-senke, im Kühlbetrieb sollte sie 17 bis 19 °C anstreben, im Heizbetrieb 28 bis 30 °C. Die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb kann an einem bestimmten Datum oder nach mehrtägiger Über- bzw. Unterschreitung einer tagesdurchschnittlichen Außentemperatur erfolgen. Alternativ kann eine geregelte Vorlauftemperatur auf konstante Werte vorgesehen werden. Eine dritte Variante, welche auch in [Pfafferott et al. 2015, 109f] diskutiert wird, sieht eine außen-temperaturgeregelte Vorlauftemperatur nach folgenden Gleichungen vor, wobei ein „Energienullband“ (dead-band) bei einer Raumtemperatur zwischen 21 und 23 °C empfohlen wird, in dem weder geheizt noch gekühlt wird. Dadurch wird ein gleichzeitiges Heizen und Kühlen vermieden.

$$\theta_{VL} = 0,35 \cdot (18^\circ\text{C} - \theta_e) + 18^\circ\text{C} \quad \text{im Kühlbetrieb bzw.} \quad (2-3)$$

$$\theta_{VL} = 0,45 \cdot (18^\circ\text{C} - \theta_e) + 18^\circ\text{C} \quad \text{im Heizbetrieb} \quad (2-4)$$

mit θ_{VL} [°C] Vorlauftemperatur

θ_e [°C] Außentemperatur (oder gleitender Mittelwert der Außentemperatur)

Bei einer minimalen Vorlauftemperatur von 18 °C zur Vermeidung von Tauwasser ergeben sich die in Bild 2-6 dargestellten Kennlinien.

Die Kennlinien wurden durch [Olesen und Dossi 2004] anhand von Simulationsstudien unter Berücksichtigung des thermischen Komforts entwickelt. Anstelle des Momentanwerts der Außenlufttemperatur kann z. B. ein Mittelwert der vergangenen 24 Stunden oder der gleitende Mittelwert nach [DIN EN 15251:2012-12] zur Regelung verwendet werden. Auch ist es möglich ein prädiktives Verfahren einzusetzen, bei dem die Außentemperatur aus einer Wetterprognose Verwendung findet. Der Nutzen wird nach [Olesen und Dossi 2004, 12] als gering eingestuft. In [Pfafferott et al. 2015, 110] hingegen werden neue erfolgreiche Ansätze einer prädiktiven Regelung beschrieben.

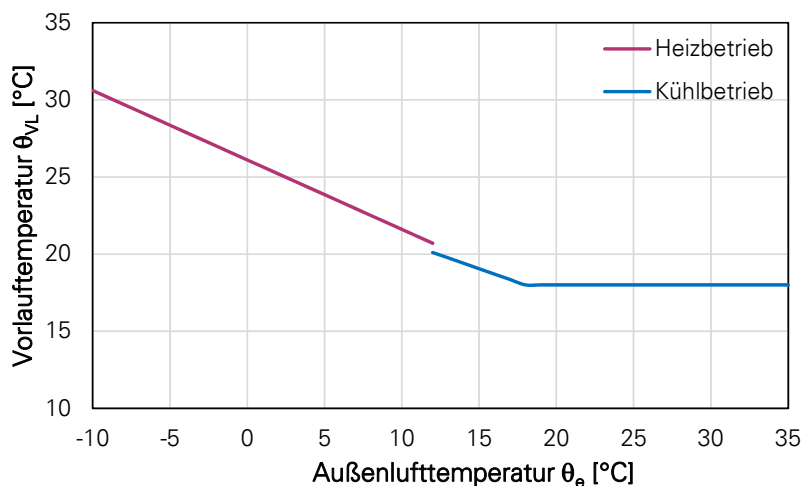


Bild 2-6 Kennlinien für die Vorlauftemperatur im Heiz- und Kühlbetrieb in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur nach [Olesen und Dossi 2004], eigene Darstellung.

In der Praxis kommt häufig eine Regelstrategie mit konstanter Vorlauftemperatur im Heizbetrieb und nach unten begrenzter, freier Vorlauftemperatur im Kühlbetrieb zum Einsatz. Dabei muss zusätzlich eine sinnvolle Regelung der Pumpenlaufzeit erfolgen [Pfafferott et al. 2015, 110].

Da im Falle einer passiven Kühlung nicht sichergestellt werden kann, dass die Vorlauftemperatur ein konstantes Niveau vorweist, ist hier die nach unten begrenzte, freie Vorlauftemperatur vorzusehen. Die Bauteilkühlung kann somit

aktiviert werden, sobald die Raumtemperatur einen festzulegenden Wert überschreitet und ausgeschaltet, wenn eine ausreichend niedrige Raumtemperatur oder die Gefahr der Kondensation an den Bauteilflächen vorliegt. Wie hoch die Vorlauftemperatur in die Bauteile tatsächlich ist, hängt von der Kühlleistung der Wärmesenke ab, von der thermischen Belastung des Gebäudes und – im Falle eines Erdwärmesystems – von der Erwärmung des Untergrunds im Laufe der Kühlperiode, welche eine sinkende Effizienz des Kühlsystems zur Folge hat. Häufig wird hier von einer „Ermüdung“ des Erdreichs gesprochen.

Die zu wählenden Rohrdurchmesser und -abstände einer Bauteilaktivierung unterscheiden sich je nach System. Hierbei variieren die Angaben in der Literatur. Nach [Pfafferott et al. 2015, 26] sind im Falle einer Betonkerntemperierung verhältnismäßig große Rohrdurchmesser von 14 bis 20 mm üblich, ggf. auch größere. Die Rohre werden im Abstand von 15 bis 30 cm im mittleren Bereich der Betondecke verlegt. Oberflächennahe Systeme, wie z. B. eine Fußboden-temperierung, verfügen über Durchmesser von 10 bis 14 mm und ggf. geringe Abstände von 7,5 cm. Als Material kommt üblicherweise Kunststoff (vernetztes PE) zum Einsatz, häufig als Mehrschichtverbundrohre. Kapillarrohrmattensysteme weisen abweichende Eigenschaften auf, werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht näher betrachtet.

Nach [DIN EN 1264-1:2011-09] werden vier verschiedene Systemtypen definiert. Für den Typ A, welcher ein System mit Rohren innerhalb des Estrichs widerspiegelt, werden verschiedene PE-Rohreigenschaften angegeben: PE-X-Rohre mit 16 mm x 2 mm und 25 mm x 2,5 mm [DIN EN 1264-2:2013-03]. Hersteller wie z. B. REHAU geben Rohrdurchmesser von 14 bis 20 mm für unterschiedliche im Estrich verlegte Systeme an [REHAU 2016b]. Für eine Betonkernaktivierung gibt REHAU Durchmesser von 17 bis 20 mm an, im Falle einer oberflächennahen Betonkernaktivierung werden 14 mm Durchmesser verwendet [REHAU 2012, 7]. Dabei werden üblicherweise größere Rohdeckenstärken von 25 bis 30 cm verbaut, um die Speicherwirkung zu verbessern [REHAU 2012, 9].

In [Hauser 2001, 13] wird die nassverlegte Fußbodenheizung (entspricht Typ A nach [DIN EN 1264-1:2011-09]) mit einem Verlegeabstand von bis zu 16 cm hinsichtlich der Heiz- und Kühlleistung als die günstigste Variante hervorgehoben. Günstig für niedrige Systemtemperaturen (im Winterbetrieb) sind geringere Verlegeabstände in den Randzonen der Räume und größere Abstände in den Aufenthaltsbereichen. Zudem steigert dies die Behaglichkeit und führt zu angenehmeren Fußbodentemperaturen trotz hoher Heizleistung [REHAU 2016b,

17]. Eine dichte Verlegung erhöht die Dynamik des Systems und führt somit zu einem schnelleren Aufheizen und Abkühlen. Aus diesem Grund wurde beispielsweise der Verlegeabstand im Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) in Kassel mit 15 cm realisiert, in Räumen mit zwei Außenwänden hingegen mit 10 cm [Hauser et al. 2004, 25].

Um den Hilfsenergiebedarf einer Bauteilaktivierung zu begrenzen, ist eine sinnvolle hydraulische Planung wichtig. Aufgrund der geringen Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauf werden sie mit relativ hohen Massenströmen betrieben, welche einen erhöhten Hilfsenergieaufwand für die Umwälzung des Wassers mit sich bringen. Gemäß [Pfafferott et al. 2015, 93] liegt beispielsweise der flächenspezifische Massenstrom einer Betonkerntemperatur bei 5 bis 12 kg/(m²·h), um eine flächenspezifische Leistung von 30 bis 40 W/m²_{TABS} zu erzielen. Für Grundlastsysteme liegt er typischerweise bei etwa 10 kg/(m²·h) und für Hochleistungssysteme bei 40 kg/(m²·h) [Pfafferott et al. 2015, 97]. Im ZUB in Kassel sind eine Fußbodenheizung sowie eine Betonkernaktivierung eingebaut. Hier wurden alle Heiz-/Kühlkreise auf einen Massenstrom von 5,5 kg/(m²·h) ausgelegt, im Betrieb wurde dieser auf bis zu 10 kg/(m²·h) erhöht. Die Auslegung erfolgte jedoch für den Heizbetrieb [Hauser et al. 2004, 24f]. Der Massenstrom kann gesenkt werden, indem eine größere Anzahl von hydraulischen Kreisen mit kürzeren Rohrlängen vorgesehen und somit geringere Druckverluste erzeugt werden [Pfafferott et al. 2015, 93].

Eine Hilfestellung für die Planung, Auslegung und Installation einer Bauteilaktivierung bietet auch die Normenreihe DIN EN ISO 11855 „Umweltgerechte Gebäudeplanung – Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme“. [DIN EN ISO 11855:2016-11] besteht aus fünf Teilen und hat zum Ziel, Kriterien bereitzustellen, welche eine effektive Planung flächenintegrierter Systeme ermöglichen. Teil 3 enthält ein „Systemplanungs- und -auslegungsverfahren, durch das die Heiz- und Kühlleistung der flächenintegrierten Strahlheizungs- und -kühlsysteme gewährleistet“ werden soll.

2.4 Wärmesenken zur passiven Kühlung

2.4.1 Kühlung über die Außenluft

2.4.1.1 Effektive Nutzung kühler Außenlufttemperaturen

Die einfachste Kühlung über die Außenluft ist die direkte Nutzung kühler Außenlufttemperaturen mithilfe einer Lüftungsanlage oder über Fensteröffnungen, wie schon in Kapitel 2.3.1 beschrieben. Dabei sollte ein Luftaustausch bei höheren Außenlufttemperaturen möglichst vermieden werden, was häufig durch ein fehlerhaftes Nutzerverhalten hervorgerufen wird. Durch sinnvolle Regelstrategien einer Lüftungsanlage oder von Lüftungsöffnungen kann die Gefahr eines zur Erwärmung führenden Luftaustauschs reduziert werden. Am effektivsten ist das Lüften während der Nacht und in den frühen Morgenstunden. Es ist zu erwähnen, dass die Nachtlüftung allein *nicht* zu den Systemen der passiven Kühlung gemäß Definition nach [DIN 4108-2:2013-02] zählt. Sie wird an dieser Stelle dennoch beschrieben, da sie mit passiven Kühlsystemen kombiniert werden und eine Voraussetzung für ihre Effizienz sein kann.

Nach [DIN 4108-2:2013-02] kann eine erhöhte oder hohe Nachtlüftung beim Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes in Ansatz gebracht werden. Eine erhöhte Nachtlüftung ist demnach gegeben, wenn ein Luftwechsel von $n \geq 2 \text{ h}^{-1}$ sichergestellt ist, eine hohe Nachtlüftung erfordert dagegen Luftwechsel von $n \geq 5 \text{ h}^{-1}$. In Wohngebäuden ist meistens die Möglichkeit einer erhöhten Nachtlüftung ohne Einsatz einer mechanischen Lüftung gegeben, da hier ein Öffnen der Fenster bei Nacht meistens unproblematisch ist. Eine hohe Nachtlüftung ist schwieriger zu realisieren, da hierzu entsprechende bauliche Eigenschaften notwendig sind, um eine ausreichende Gebäudedurchströmung zu ermöglichen. Beispielsweise können Atrien oder Treppenhäuser mit Öffnungen im Dachbereich eine geschossübergreifende Lüftung sicherstellen. Der erforderliche Luftwechsel kann jedoch auch durch eine Lüftungsanlage erreicht werden.

Das mitteleuropäische Klima bietet gute Voraussetzungen für eine Nachtlüftung, da auch im Sommer die Außentemperatur nachts meistens auf unter 20 °C sinkt.

Das Prinzip der natürlichen erhöhten und hohen Nachtlüftung ist in Bild 2-7 dargestellt. Bei der erhöhten Nachtlüftung (links) kann ein Öffnen der im Raum befindlichen Fenster genügen, um den erforderlichen Luftwechsel zu erreichen. Besser ist es, eine Querlüftung herzustellen, indem gegenüber liegende Fenster geöffnet werden. Eine hohe Nachtlüftung (rechts) kann durch die geschossübergreifende Lüftung realisiert werden. Hierbei ist ein Öffnen von Fenstern sowie

Türen nötig, damit die Luft möglichst durch das gesamte Gebäude strömen kann. Alternativ können Überströmöffnungen an den Türen eingesetzt werden. Eine Herstellung des erforderlichen Luftwechsel von $n \geq 5 \text{ h}^{-1}$ für eine hohe Nachtlüftung kann dabei jedoch nicht garantiert werden.

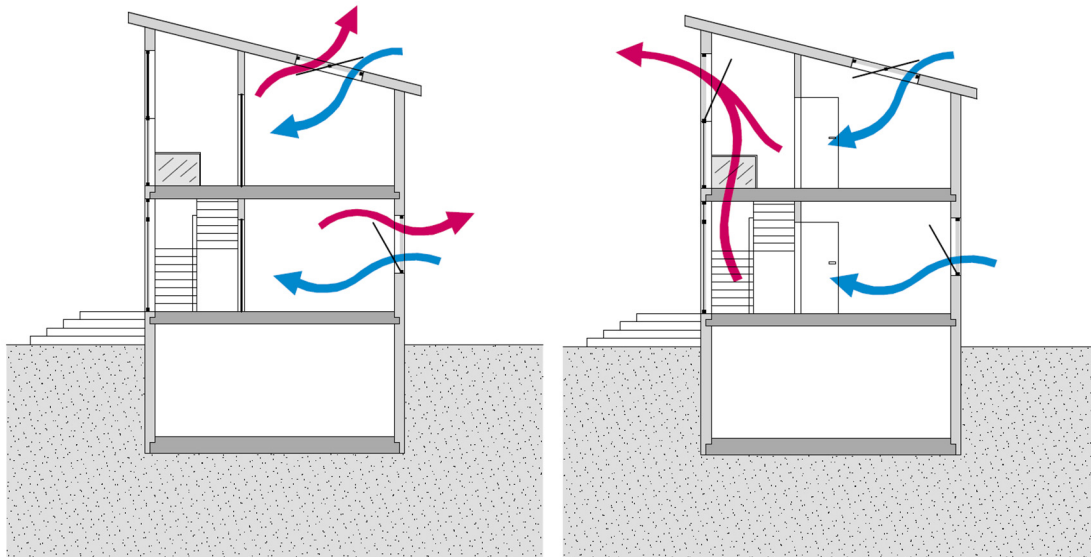


Bild 2-7 Prinzip der erhöhten (links) und hohen (rechts) natürlichen Nachtlüftung.

2.4.1.2 Rückkühlung

Auch ein Rückkühlwerk bzw. ein Kühlturm nutzt, vorwiegend in den Nachtstunden, die Außenluft als Wärmesenke. Die Kühlung über die Außenluft kann jedoch im Gegensatz zur herkömmlichen Nachtlüftung mit einer Bauteilaktivierung kombiniert werden. Das zu kühlende Wasser zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf über einen Wärmeübertrager, der mithilfe von Ventilatoren von der Außenluft durchströmt wird. Zu unterscheiden ist zwischen Trocken- und Nasskühlern. Trockenkühler können an warmen Tagen nur nachts und in den frühen Morgenstunden eingesetzt werden, wenn die Außenluft unter der benötigten Betriebstemperatur der Bauteilaktivierung (16 bis 20 °C) liegt. Die Wärmeübertragung erfolgt sensibel. Nasskühler hingegen besprühen den Wärmeübertrager auf der Luftseite zusätzlich mit Wasser, um eine Abkühlung durch die Verdunstung des Sprühwassers zu erreichen. Es erfolgt, zusätzlich zur sensiblen, eine latente Wärmeübertragung an die Außenluft. Nasskühler können somit trotz hoher Außenlufttemperaturen auch tagsüber eine Kühlleistung erbringen [Uponor 2009, 536]. Eine weitere Möglichkeit der Rückkühlung stellt die hybride Ausführung dar, bei der sowohl Trocken- als auch Nasskühlung möglich sind und die Wärmeübertragung je nach Klimaverhältnissen sensibel, latent oder kombiniert erfolgt [Händel 2011, 24]. Die Trockenkühlung wird gemäß [Uponor 2009, 536] trotz der

Leistungseinbußen aufgrund geringerer Investitions- und Betriebskosten häufiger eingesetzt.

Rückkühlwerke können als offenes oder geschlossenes System umgesetzt werden. Während Trockenkühler eine geschlossene Bauart aufweisen, können Nasskühler auch offen ausgeführt werden, indem das zu kühlende Wasser mittels Sprühdüsen über Kunststoff-Rieseleinbauten verteilt wird. Kühlwasser und Luft sind somit in direktem Kontakt.

Vorteil der geschlossenen Ausführung ist, dass das Kühlwasser nicht mit der Außenluft in Berührung kommt und somit nicht verschmutzt oder durch Luftsauerstoff- oder Salzanreicherung aggressiv wird. Außerdem kann die geschlossene Variante als hybride Kühlung genutzt werden, sodass bei niedriger Außenlufttemperatur, wenn die Trockenkühlung ausreicht, eine Einstellung der Besprühung möglich ist. Nachteilig sind jedoch die gegenüber der offenen Ausführung höheren Investitionskosten. Diese kommen durch den höheren technischen Aufwand sowie durch die größere Dimensionierung zustande, da der Wärmedurchgangswiderstand am Wärmeübertrager zusätzlich überwunden werden muss [Recknagel et al. 2015b, 2213].

Tabelle 2-3 zeigt eine Übersicht der möglichen Bauarten und Eigenschaften von Rückkühlwerken bzw. Kühltürmen.

Tabelle 2-3 Eigenschaften von Kühltürmen.

Kühlvorgang	Bauart	Wärmeübertragung	Begrenzung durch
Nasskühlung (mit Besprühung)	offen oder geschlossen	latent und sensibel	Feuchtkugeltemperatur
Trockenkühlung (ohne Besprühung)	geschlossen	sensibel	Außenlufttemperatur
hybride Kühlung (mit oder ohne Besprühung)	geschlossen	latent und/oder sensibel je nach Klimaverhältnissen	Feuchtkugeltemperatur

Weiterhin wird unterschieden zwischen saug- oder druckbelüfteten Rückkühlern sowie zwischen Gegen- oder Kreuzstromführung der Luft und des Wassers. Bild 2-8 zeigt verschiedene offene Ausführungen von Kühltürmen nach [Rietschel und Fitzner 2008, 517] sowie eine geschlossene nach [VDI e.V. et al. 2013, 1669].

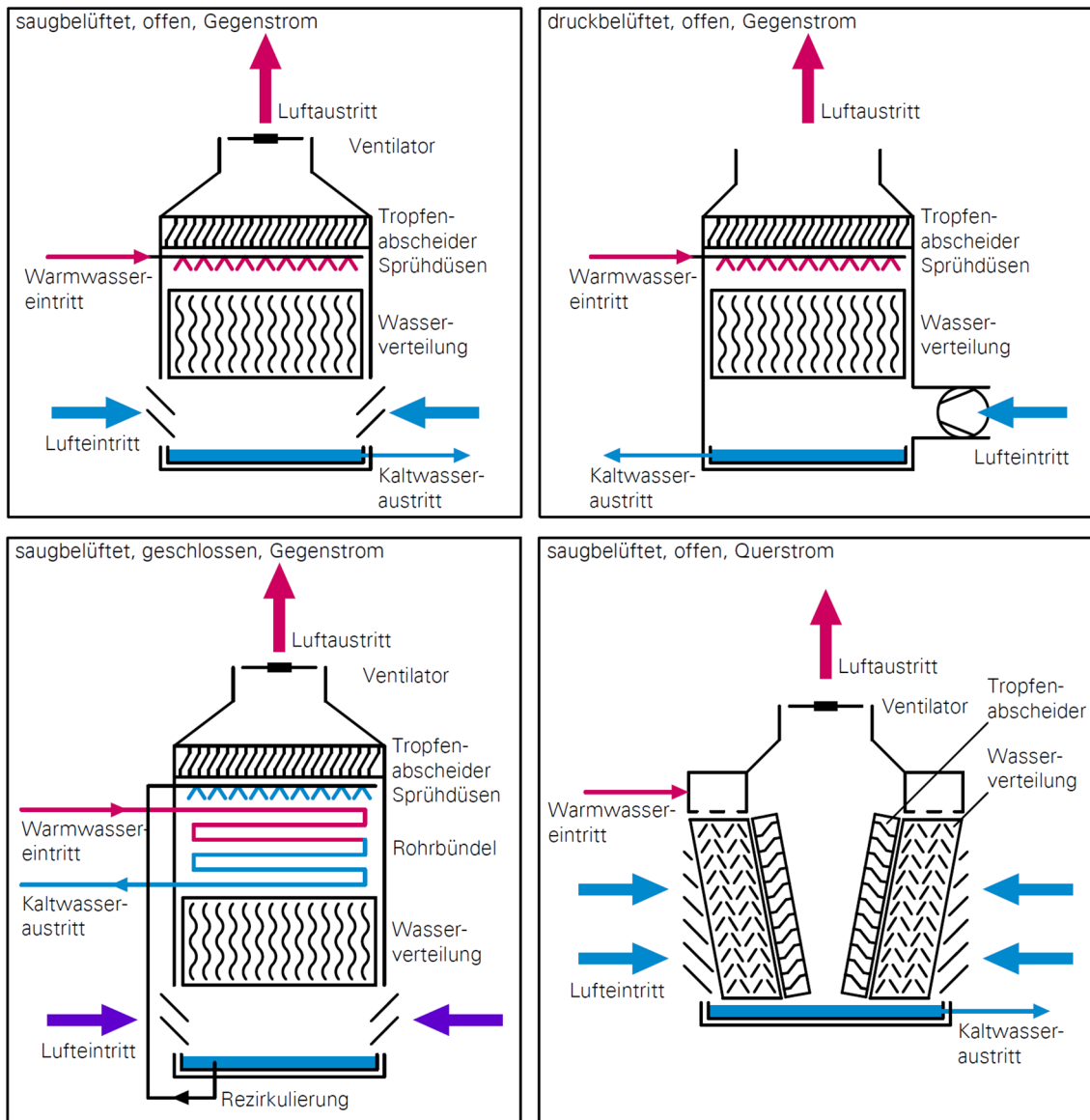


Bild 2-8 Verschiedene Bauarten von Nass-Kühltürmen vgl. [Rietschel und Fitzner 2008, 517] und [VDI e.V. et al. 2013, 1669], eigene Darstellung.

Die erzielbare Abkühlung eines Trockenkühlers hängt aufgrund der fehlenden Besprühung von der Außenlufttemperatur ab. Bei Nasskühlern hingegen ist die Feuchtkugeltemperatur ausschlaggebend, welche insbesondere bei niedriger relativer Luftfeuchte deutlich unter der Außenlufttemperatur liegt [Uponor 2009, 536]. Nach [Händel 2011, 24] kann die Temperatur des Kühlwassers auf etwa 4 K über der Feuchtkugeltemperatur gekühlt werden.

Bei der Bemessung eines Rückkühlwerks mit Besprühung ist der Abkühlungsgrad, bzw. die Temperaturdifferenz zwischen Kühlwasseraustritts- und Feuchtkugeltemperatur (Kühlgrenzabstand) entscheidend. Je kleiner diese ist, desto größer muss das Rückkühlwerk dimensioniert werden [Recknagel et al. 2015b, 2211].

Das Prinzip einer möglichen Gebäudeintegration eines geschlossenen, druckbelüfteten Nass-Rückkühlwerks kombiniert mit einer Bauteilaktivierung zeigt Bild 2-9. Da die ggf. austretenden Aerosole nicht über Fensteröffnungen in Aufenthaltsräume gelangen dürfen, ist eine Aufstellung des Rückkühlwerks im Keller nicht möglich.

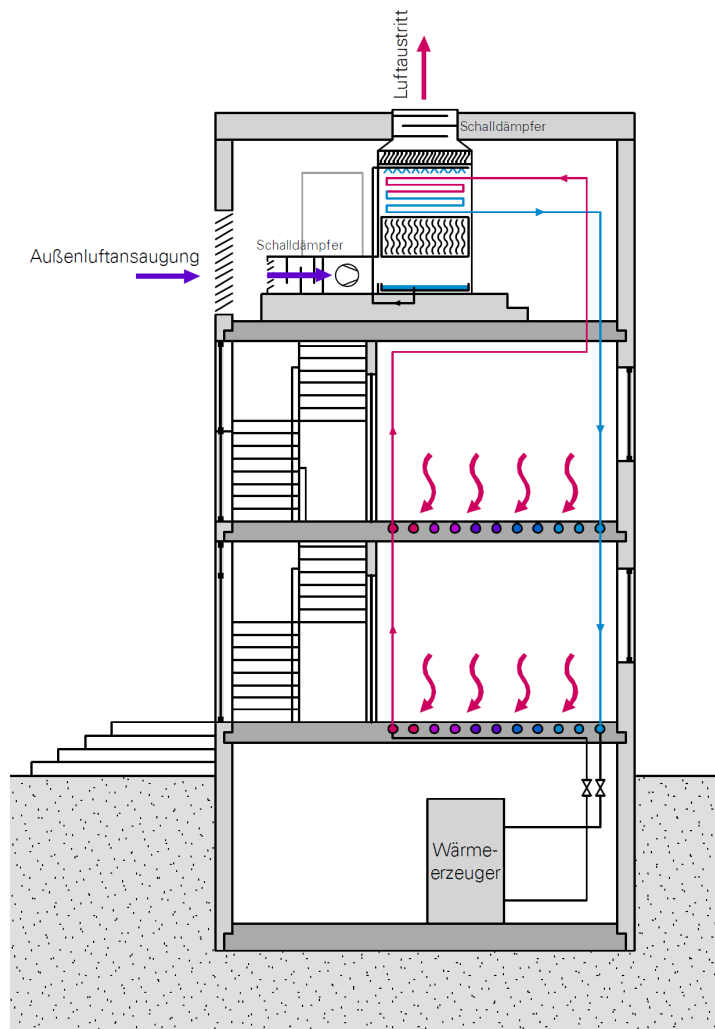


Bild 2-9 Beispiel für die Integration eines druckbelüfteten Nass-Rückkühlwerks in die Dachzentrale eines Gebäudes, vgl. [Pfeiffenberger 2014] und [VDI e.V. et al. 2013, 1669], eigene Darstellung.

Die Nutzung von Rückkühlwerken zur freien Kühlung mit einer Bauteilaktivierung scheint in der Praxis bisher keine starke Resonanz gefunden zu haben. Die Möglichkeit wird zwar an verschiedenen Stellen in der Literatur erwähnt, jedoch finden sich wenige Angaben zu Planung und Betrieb. Rückkühlwerke kommen vielfach für die Abfuhr von überschüssiger Wärme aus industriellen Prozessen oder in Klima- und Kälteanlagen zum Einsatz. Hierbei kann die Dimensionierung der benötigten Kontaktfläche eines Verdunstungskühlers nach der Merkel'schen Hauptgleichung der Kühlturmtechnik erfolgen. Diese gilt für einen Gegenstrom unter vereinfachenden Annahmen und lautet:

$$Me = \int_0^A \frac{\beta \cdot dA}{\dot{m}_W} = \int_{\theta_{W1}}^{\theta_{W2}} \frac{c_{p,W} \cdot d\theta_W}{h_s - h_L} \quad (2-5)$$

mit	Me	[-]	Merkel-Zahl
	A	[m ²]	Austauschfläche
	\dot{m}_W	[kg/s]	Wassermassenstrom
	β	[kg/(m ² ·s)]	Stoffübergangskoeffizient
	$c_{p,W}$	[kJ/(kg·K)]	spez. Wärmekapazität Wasser (= 4,18 kJ/(kg·K))
	θ_W	[°C]	Wasserein- und Wasseraustrittstemperatur
	h_s	[kJ/kg]	Enthalpie der gesättigten Luft
	h_L	[kJ/kg]	Enthalpie feuchter Luft

Dabei definiert das rechte Integral den Schwierigkeitsgrad, Wasser bei den vorhandenen Umgebungsbedingungen auf die geforderte Temperatur abzukühlen. Der Schwierigkeitsgrad wird auch als Zahl der Übertragungseinheiten Merkel-Zahl Me bezeichnet [Recknagel et al. 2015b, 2207]. Durch Rezirkulation feuchter Luft wird dabei die Enthalpie der feuchten Luft h_L größer und damit auch die Größe des Integrals. Infolgedessen muss entweder die Austauschfläche vergrößert werden oder die Wasserabkühlung wird geringer [Rietschel und Fitzner 2008, 513]. Die Wärme- und Feuchteübertragungsvorgänge von Kühltürmen werden ausführlich in [VDI e.V. et al. 2013, 1660ff] beschrieben.

In [Recknagel et al. 2015b, 2211] werden übliche Auslegungstemperaturen für die Wasserrückkühlung in Kälteanlagen ausgewiesen. Inwieweit diese Angaben jedoch für die freie Kühlung mit einer Bauteilaktivierung verwendet werden können, ist unklar, da hier niedrigere Temperaturen vorliegen und das Rückkühlwerk die benötigten Temperaturen alleine bereitstellen muss. Es werden jedoch Angaben zu üblichen Temperaturspreizungen gemacht: Die Kühlzonenbreite (Temperaturspreizung $\theta_{W1} - \theta_{W2}$ des Wassers) liegt bei 5 bis 7 K, der Kühlgrenzabstand (Temperaturdifferenz Kaltwasser θ_{W2} zu Feuchtkugeltemperatur θ_f) bei 3 bis 5 K [Recknagel et al. 2015b, 2206]. Nach [Pfeiffenberger 2014] liegen in der Praxis auch höhere Kühlgrenzabstände zwischen 4 und 7 K vor. Es stellt sich weiterhin die Frage nach der Bemessungs-Feuchtkugeltemperatur. Diese wird von vielen Herstellern mit 21 °C angegeben. Nach [Pfeiffenberger 2014] ist diese Angabe aufgrund von Klimaveränderungen veraltet und sollte durch die regionsspezifischen Daten des Deutschen Wetterdienstes gemäß [VDI 4710-3:2011-03] ersetzt werden. Diese VDI-Richtlinie gibt zur Auslegung von Rückkühlwerken Außentemperaturen und Enthalpien für die 15 TRY-Repräsentanzstationen auf Basis der

Daten des Deutschen Wetterdienstes von 1990 bis 2005 bei einem Risiko von 0,1 % Überschreitungshäufigkeit an. Anhand der Enthalpie kann die Feuchtkugeltemperatur bestimmt werden. Für Kassel wird beispielsweise eine Auslegungstemperatur von 32 °C und eine Enthalpie von 63 kJ/kg angegeben. Die entsprechende Feuchtkugeltemperatur kann aus einem Mollier-h,x-Diagramm abgelesen oder berechnet werden und beträgt 21,6 °C [Ziller 2015]. Das h,x-Diagramm beruht auf folgendem Zusammenhang [Recknagel et al. 2015a, 220]:

$$h = h_L + x \cdot h_D \quad (2-6)$$

$$h = c_{p,L} \cdot \theta + x \cdot (r_0 + c_{p,D} \cdot \theta) \quad (2-7)$$

mit	h	[kJ/kg]	Enthalpie der Luft-Wasserdampf-Mischung (bezogen auf 1 kg trockener Luft) (h_L Enthalpie der Luft, h_D Enthalpie des Wasserdampfes)
	x	[kg/kg]	Feuchtegehalt der Luft (kg Wasserdampf je kg Luft) $x = 0,622 \cdot \frac{p_D}{p - p_D}$
	θ	[°C]	Lufttemperatur
	r_0	[kJ/kg]	spez. Verdampfungswärme am Tripelpunkt, $r = 2501$ kJ/kg
	$c_{p,L}$	[kJ/(kg·K)]	spez. Wärmekapazität der trockenen Luft, $c_{p,L} = 1,01$ kJ/(kg·K)
	$c_{p,D}$	[kJ/(kg·K)]	spez. Wärmekapazität des Wasserdampfes, $c_{p,L} = 1,86$ kJ/(kg·K)
	p	[Pa]	Luftdruck ($p = 1,013$ bar)
	p_D	[Pa]	Wasserdampfpartialdruck

Verfügt ein Gebäude über ein Rückkühlwerk sowie eine Lüftungsanlage, muss auf die Position der Außenluftansaugöffnungen geachtet werden, da die Schwaden des Rückkühlwerks nicht in die Frischluftzufuhr gelangen dürfen. Durch den Tröpfchenauswurf bei der Verdunstung des Kühlwassers können Keime in die Luft gelangen. Hier herrscht ein Risiko für Legionelleninfektionen [Rietschel und Fitzner 2008, 421ff; 655]. Um die Hygiene von Rückkühlwerken sicherzustellen, ist im Jahr 2015 eine VDI-Richtlinie erschienen [VDI 2047-2:2015-01].

Bei jeder Art der Verdunstungskühlung muss beachtet werden, dass zusätzlich zum elektrischen Hilfsenergiebedarf ein Wasserbedarf hinzukommt. Dieser kommt durch Tropfenauswurf, Absalzung und Verdunstungsverluste zustande. Der Wasserverlust muss durch die Nachspeisung von Frischwasser stetig ausgeglichen

werden. Der Wasserverlust durch Tropfenauswurf (in Form von Aerosolen) kann durch die Verwendung hochwirksamer Tropfenabscheider verringert werden. Daneben hat die Art der Versprühung Einfluss auf die Verluste. Die Tropfenauswurfmenge ist jedoch verhältnismäßig gering und kann bei der Verbrauchsabrechnung vernachlässigt werden [Bergmann 2014].

Aufgrund des ständigen Kontakts des Kühlwassers mit der Umgebungsluft kommt es zu einem Eintrag von Schmutzstoffen aus der Luft sowie einer Anreicherung mit Salzen verursacht durch die Verdunstung. Dies führt zu einer für das Umlaufsystem schädlichen Eindickung des Wassers. Daher muss eine Absalzung (auch Abschläm- mung) erfolgen, indem ein Teil des eingedickten Wassers regelmäßig durch Ergänzungswasser mit niedrigem Salz- und Schmutzgehalt ersetzt wird [Bergmann 2014]. Die benötigte Wassermenge ist abhängig von der zulässigen Eindickung, welche wiederum durch die Härte des Nachspeisewassers bestimmt wird [Recknagel et al. 2015b, 2212]. Wird das Rückkühlwerk geschlossen ausgeführt, werden Verschmutzungen aus der Umwelt ferngehalten [Fecht 2013, 78].

Des Weiteren fallen Verdunstungsverluste an. Gegenüber Tropfenauswurf und Absalzung weisen die Verluste durch Verdunstung starke Schwankungen auf. Die Höhe der verdunstenden Wassermenge wird überwiegend durch die abzuführende Wärmemenge und das Klima bestimmt [Bergmann 2014].

Es bestehen verschiedene Faustformeln zur Abschätzung der Verluste, welche für die Dimensionierung der Nachspeiseleitung verwendet werden können. Für eine Abschätzung des gesamten Wasserbedarfs, sollte nach [Bergmann 2014] jedoch eine Simulation durchgeführt werden, da er von vielen Faktoren wie Lastprofil, Regelung, Wasserqualität und Betriebsstunden abhängt. Dennoch werden in [Recknagel et al. 2015b, 2212] Richtwerte für den Frischwasserbedarf bezogen auf 1 kW Kälteleistung wie folgt angegeben:

Zur Ergänzung des verdunsteten Wassers:	\dot{m}_W	ca. 2 kg/h
Zur Ergänzung der Spritzwasserverluste:	\dot{m}_S	ca. 1 kg/h
Zur Absalzung:	\dot{m}_A	ca. 3 kg/h
Insgesamt:	\dot{m}_F	ca. 6 kg/h

Eine Möglichkeit den Wasserbedarf von Rückkühlwerken gering zu halten ist der Einsatz eines hybriden Rückkühlers, der nur an heißen Sommertagen die Verdunstungsfunktion nutzt und hierzu gesammeltes Regenwasser verwendet. An den restlichen Tagen kann die Kühlung trocken über die Umgebungsluft erfolgen [Fecht 2015, 79].

2.4.1.3 Adiabate Kühlung

Prinzip der adiabaten Kühlung oder Verdunstungskühlung ist, dass verdunstendes Wasser in einem abgeschlossenen System der Luft Wärme entzieht. Dieser Vorgang wird genutzt, indem der Luftstrom in einem Lüftungsgerät befeuchtet wird, wodurch eine Abkühlung hervorgerufen wird.

Die direkte Befeuchtung der Zuluft ist in Mitteleuropa in der Regel nicht möglich, da hierzu ein heißes, trockenes Klima Voraussetzung ist. Daher wird üblicherweise die Abluft befeuchtet. Im Anschluss entzieht diese der Zuluft Wärme mithilfe eines Wärmeübertragers. So ist eine Abkühlung der Außenluft bis zu etwa 10 K möglich, wenn bei der Befeuchtung eine Übersättigung der Abluft stattfindet [Kabus 2009]. Die Funktionsweise wird in Bild 2-10 vereinfachend verdeutlicht.

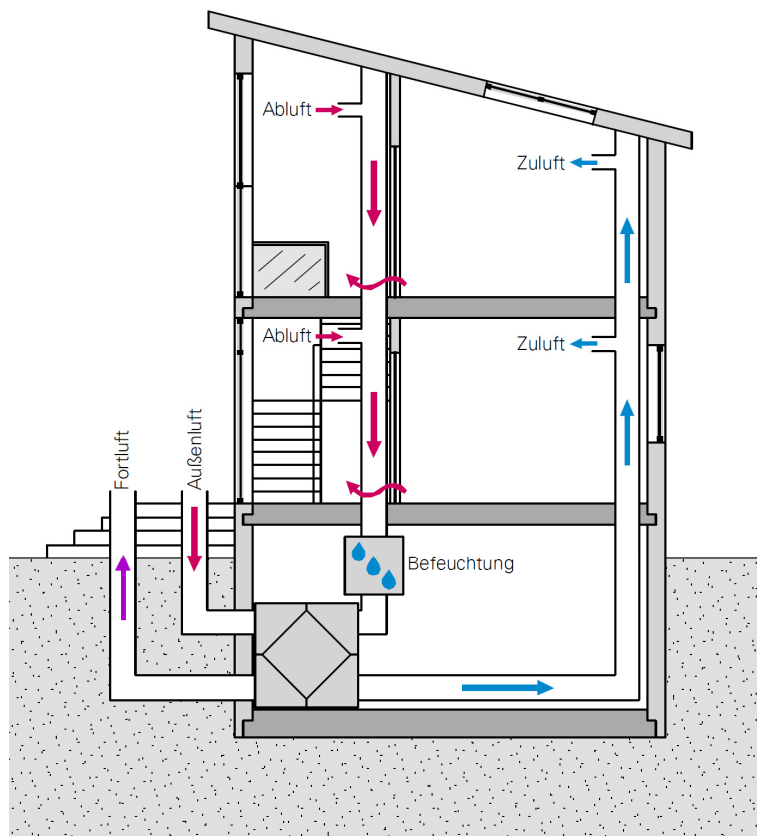


Bild 2-10 Prinzip der adiabaten Kühlung mit Platzierung der Lüftungszentrale im Keller. Die Abluft wird befeuchtet, kühlt ab und entzieht der Zuluft Wärme mittels eines Wärmeübertragers.

Bei der Auslegung ist zu beachten, dass die Höhe des Kühlpotenzials der adiabaten Kühlung maßgeblich von der Feuchtigkeit der Außenluft abhängt, da diese den Feuchtegehalt und damit die Wasseraufnahmefähigkeit der Abluft beeinflusst. Findet eine hohe Feuchteproduktion im Raum statt, eignet sich daher die adiabate Kühlung nicht [Zimmermann 2003].

Alternativ kann die sorptionsgestützte Kühlung zum Einsatz kommen, die auch bei höheren Luftfeuchten gute Kühlleistungen erreicht. Hierbei erfolgt eine Befeuchtung der Zuluft mit vorgeschalteter Lufttrocknung auf den gewünschten Feuchtegrad z. B. mithilfe eines mechanisch betriebenen Sorptionsrades oder hygroskopischer Medien, die auf einem Sorptionskörper aufgebracht werden [Kabus 2009].

Wann Wasser- und Hilfsenergiebedarf der adiabaten Kühlung das energetisch sinnvolle Maß überschreiten, ist zu prüfen. Insbesondere die sorptionsgestützte Kühlung übersteigt unter Umständen den für die Anrechnung als passive Kühlung akzeptablen Energiebedarf, da bei einer Übersättigung des Sorptionskörpers weitere Energie für die Regeneration aufgebracht werden muss [Kabus 2009]. Zusätzlich kann ein hoher Energieaufwand für die Wasseraufbereitung (Entsalzung) hinzukommen [Zimmermann 2003]. Der Energiebedarf für die Regeneration kann jedoch beispielsweise durch Solarwärme bewerkstelligt werden. Ein gebautes Beispiel dafür stellt die Stadtbibliothek Nürnberg dar, welche über ein Lüftungsgerät verfügt, das mit dem Prinzip der sorptiven Entfeuchtung und adiabatischen Verdunstungskühlung arbeitet. Die Trocknung der Salzlösung erfolgt mithilfe einer Solaranlage [Münter 2015].

Nach [Ranft und Frohn 2004] ist eine gut ausgelegte adiabate Kühlung jedoch beinahe immer energetisch sinnvoll. Gegenüber einer aktiven Kühlung werden Stromverbrauch und elektrische Aufnahmeleistung deutlich reduziert. Im Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) wird die Kälteleistung der adiabaten Verdunstungskühlung daher auch als regenerative Energie anerkannt [Berger 2014a].

Die erreichbaren Leistungen und Zulufttemperaturen weisen bei der adiabaten Verdunstungskühlung eine hohe Abhängigkeit von der Außen- und Abluftfeuchte auf. Die theoretisch minimal erreichbare Zulufttemperatur entspricht der Feuchtkugelttemperatur der Abluft. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit kann der adiabate Kühlwirkungsgrad Φ_{adia} dienen. Dieser ist wie folgt definiert:

$$\Phi_{\text{adia}} = \frac{\theta_e - \theta_{\text{ZU}}}{\theta_e - \theta_{\text{f,AB}}} \quad (2-8)$$

mit θ_e [°C] Außenlufttemperatur
 θ_{ZU} [°C] Zulufttemperatur
 $\theta_{\text{f,AB}}$ [°C] Feuchtkugelttemperatur der Abluft

Je mehr die Zulufttemperatur der Feuchtkugelttemperatur der Abluft angenähert werden kann, desto höher ist somit der Wirkungsgrad. Es bieten sich zahlreiche Systemausführungen mit unterschiedlichen Leistungsfähigkeiten an. Eine technisch einfache Abluftbefeuchtung mit Rotationswärmeübertrager kommt bei hohen Luftvolumenströmen auf einen guten adiabaten Kühlwirkungsgrad von 70 % bei geringen Anschaffungskosten. Das Befeuchtungssystem, meistens ein Wabenbefeuchter, stellt keine besonderen Anforderungen an die Wasserqualität. Daher kann Leitungswasser ohne eine Aufbereitung zum Einsatz kommen. Allerdings verursacht der Wabenbefeuchter auch bei inaktiver Verdunstungskühlung Druckverluste. Da Anlagen zur adiabaten Kühlung üblicherweise zunächst frei betrieben und die Verdunstung erst bei höherem Kühlbedarf eingeschaltet wird, stellt dies einen deutlichen Schwachpunkt dar. Zudem können Rotationswärmeübertrager selbst und Leckagen an den Schleifdichtungen zu einer Übertragung von Luftfeuchtigkeit sowie ggf. von Keimen auf die Zuluft führen. Daher sind sehr kurze Wartungszyklen erforderlich. Dies kann vermieden werden, indem z. B. anstelle des Rotationswärmeübertragers ein Kreuzstrom-Plattenwärmeübertrager verwendet wird. Dieser sorgt für eine vollständige Trennung von Zu- und Abluftstrom, wodurch eine Feuchte- und Keimübertragung nicht möglich sind (auch Rekuperator genannt). Nachteil ist, dass der adiabate Kühlwirkungsgrad deutlich reduziert wird und der Plattenwärmeübertrager einen höheren Platzbedarf aufweist [Berger 2014a].

Leistungssteigerungen lassen sich durch eine direkte Abluftbefeuchtung innerhalb des Wärmeübertragers erreichen. Dadurch werden Druckverluste während des Betriebs ohne Verdunstung verhindert. Eine weitere Steigerung ist durch den Einsatz hoch effizienter Gegenstrom-Wärmeübertrager möglich. Wird zusätzlich das Wasser für die Verdunstung wiederverwendet, kann der Wasserverbrauch deutlich reduziert werden. Zwar steigen durch diese Maßnahmen die Investitionskosten, jedoch kann der adiabate Kühlwirkungsgrad auf über 90 % erhöht werden. Nach [Berger 2014a] sind durch die direkte Befeuchtung im Gegenstrom-Plattenwärmeübertrager Temperatursenkungen der Außenluft von über 14 K möglich. Mit heutigen Technologien der adiabaten Kühlung lassen sich somit hohe Anforderungen an den Komfort ohne den Einsatz einer Kältemaschine erfüllen.

Die verschiedenen Systemausführungen und ihre Eigenschaften und Leistungsmerkmale sind in [Berger 2014a] und [Berger 2014b] ausführlich beschrieben. Ihre Leistungsdaten sind in Tabelle 2-4 zu finden. Bei den Systemen 1 bis 4 handelt es sich um marktgängige Systeme, bei den Systemen 5 und 6 um Neuentwicklungen.

Tabelle 2-4 Leistungsdaten der Systeme zur adiabaten Verdunstungskühlung gemäß [Berger 2014b].

System	Φ_{adia}
1 Abluftbefeuchtung und Rotationswärmeübertrager	70 %
2 Abluftbefeuchtung und Kreuzstrom-Rekuperator	50 %
3 Abluftdirektbefeuchtung mit Frischwasser und Kreuz-Gegenstrom-Rekuperator	75 %
4 Abluftdirektbefeuchtung mit Umlaufwasser und Kreuz-Gegenstrom-Rekuperator	89 %
5 Abluftdirektbefeuchtung mit Umlaufwasser und Gegenstrom-Rekuperator	91 %
6 Abluftvorkühlung und Gegenstrom-Rekuperator	100 %

2.4.2 Kühlung über das Erdreich

Von großem Interesse für die passive Kühlung ist die Nutzung des Erdreichs als Wärmesenke. In der Praxis kommen häufig Wärmepumpen bzw. Kältemaschinen in Kombination mit einer Erdreichnutzung zum Einsatz. Da diese Anlagenkombination eine Überschreitung des für die passive Kühlung zulässigen Energiebedarfs aufweist, wird im Rahmen der Arbeit nur der freie Kühlbetrieb behandelt, bei dem elektrische Energie lediglich für Umwälzpumpen aufgebracht wird. Dabei sind Jahresarbeitszahlen von 20 bis 50 realisierbar, korrekte Dimensionierung und Betriebsweise vorausgesetzt [Bockelmann et al. 2010].

Hinsichtlich des freien Kühlbetriebs wird in [Bockelmann et al. 2010] betont, dass ohne eine winterliche Nutzung des Erdreichs als Wärmequelle die Erdreichtemperaturen zu sehr steigen können und das sommerliche Potenzial eingeschränkt ist. Mit einer winterlichen Nutzung kann eine ausreichende Regeneration des Erdreichs erfolgen und Leistungseinschränkungen können verhindert werden. Diese Problematik trifft jedoch üblicherweise nicht auf Brunnensysteme zu, da diese aufgrund des nachströmenden Grundwassers und somit konstanter und in der Regel niedrigerer Wassertemperaturen eine gute Wärmesenke darstellen.

Die im Folgenden beschriebenen geothermischen Systeme werden häufig mit einer Bauteilaktivierung in Verbindung gebracht.

2.4.2.1 Erdwärmesonden

Erdwärmesonden erweisen sich vielfach als energieeffiziente und leistungsstarke Wärmesenke (und -quelle). Sie können einzeln oder als Feld eingesetzt werden. In die üblicherweise 50 bis 100 m tiefen Bohrungen werden meist Doppel-U-Sonden und anschließend ein Verfüllmaterial zur besseren thermischen Anbindung an das Erdreich und zur Abdichtung des Bohrlochs eingebracht. Als Wärmeträgermedium wird in der Regel ein Wasser-Frostschutz-Gemisch verwendet [Bockelmann et al.

2010]. Die übliche Maximaltiefe von 100 m liegt in der bergbaurechtlichen Genehmigungspflicht in Deutschland ab 100 m begründet [Loose 2013, 7].

Aufgrund der Bohrungen sind Erdwärmesonden mit vergleichsweise hohen Investitionskosten verbunden. Nach [VDI 4640-4:2004-09] ist daher eine Wirtschaftlichkeit in der Regel nur erreichbar, wenn die Kühllast gleichmäßig über einen längeren Zeitraum verteilt anfällt. Die korrekte Auslegung eines Erdwärmesondenfelds ist sehr wichtig, um im Sommer möglichst niedrige und im Winter möglichst hohe Entzugstemperaturen zu erreichen, wie eine Analyse von Anlagen im Betrieb zeigte [Radermacher 2013].

Das Funktionsprinzip einer Bauteilaktivierung in Kombination mit einer Kühlung über Erdwärmesonden ist in Bild 2-11 dargestellt. Die Bauform der Erdwärmesonden entspricht hier einem Doppel-U-Rohr. Im Sommer wird die Raumwärme von der Bauteilaktivierung aufgenommen und über die Sondenrohre an das kühlere Erdreich abgegeben. Durch eine Kopplung an eine Wärmepumpe können die Erdwärmesonden im Winter zusätzlich als Wärmequelle dienen. Dies wirkt einer eventuellen thermischen Ermüdung des Erdreichs entgegen.

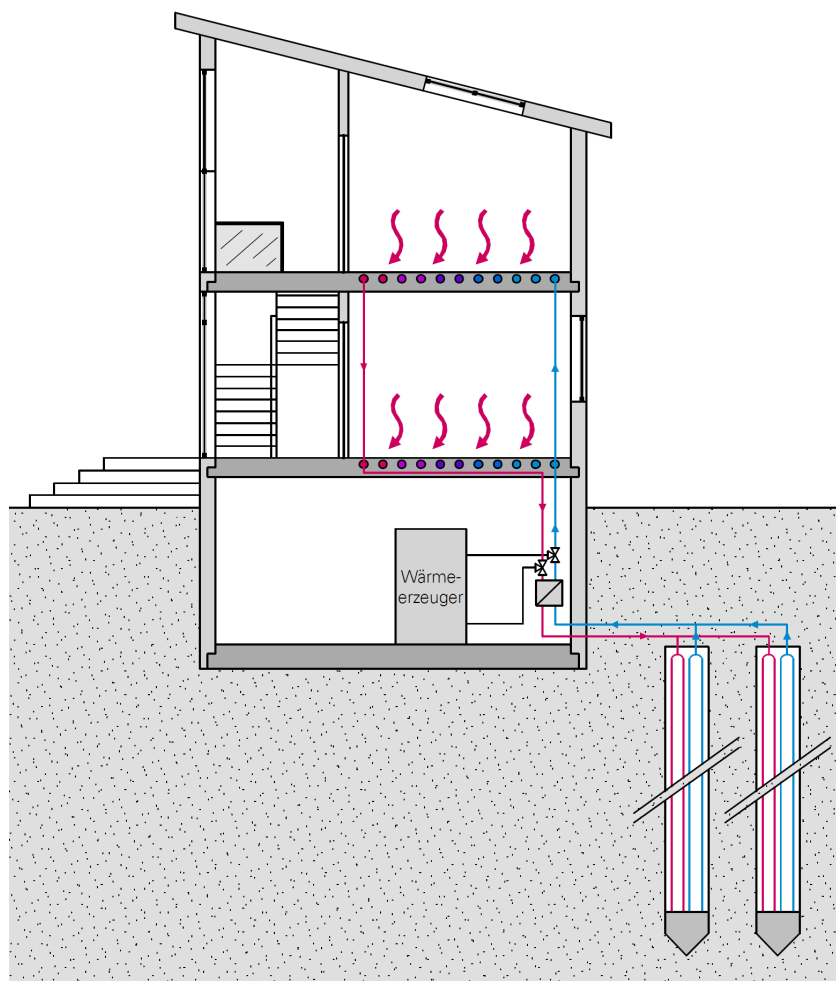
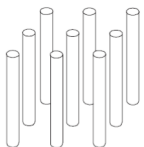
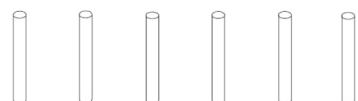


Bild 2-11 Prinzip der Bauteilaktivierung mit Kühlung über Erdwärmesonden mit Doppel-U-Sonden.

Werden Erdwärmesonden nur zur Kühlung eingesetzt, sollte ihre Anordnung gemäß [VDI 4640-4:2004-09] möglichst offen sein, also beispielsweise in linearer Form. Auf diese Weise kann der Wärmeeintrag optimal stattfinden. Eine komplexere Anordnung der Erdwärmesonden eignet sich, wenn sowohl ein Wärmeeintrag als auch -entzug stattfindet (siehe Tabelle 2-5).

Tabelle 2-5 Einfluss der Anordnung von Erdwärmesonden auf die Eignung zur direkten thermischen Nutzung nach [VDI 4640-4:2004-09].

Anordnung der Erdwärmesonden	Eignung
<p>Komplexes Feld</p> 	ungeeignet für reinen Wärmeentzug bzw. -eintrag
<p>Langgezogene Reihe</p> 	optimal geeignet für reinen Wärmeentzug bzw. -eintrag

Für die mögliche Anlagenleistung von Erdwärmesonden spielt vor allem die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs eine Rolle, da die Wärmeabfuhr vorwiegend durch Wärmeleitung stattfindet. Bei starker Grundwasserströmung erfolgt zusätzlich ein konvektiver Wärmetransport. Abhängig von der Wärmeleitfähigkeit, der maximalen Nutzungstemperatur, den Betriebsstunden und der gewünschten Leistung kann die Länge der Erdwärmesonden ermittelt werden [VDI 4640-4:2004-09].

Die Ermittlung der erforderlichen Erdwärmesondenlänge für die freie Kühlung anhand von Anhaltswerten gestaltet sich schwierig. Angaben zur Auslegung beziehen sich in der Regel auf eine ausschließliche Nutzung für den Heizbetrieb in Kombination mit einer Wärmepumpe, wie beispielsweise in [VDI 4640-2:2001-09]. Inwieweit diese Angaben auch für den Kühlfall sinnvoll sind, bleibt offen. Zudem wird die Genauigkeit der Anhaltswerte der VDI 4640 in [Loose 2013, 101] angezweifelt, da zum einen die tatsächlichen Werte erheblich von den Richtwerten der VDI abweichen können und zum anderen lediglich zwei Werte für die Vollbenutzungsdauer zur Auswahl stehen. Ein besseres Auslegungsverfahren beinhaltet die Schweizer Norm SIA 384/6 „Erdwärmesonden“, welche sich Diagrammen und Nomogrammen bedient, um dem Planer eine Auslegung mit geringem rechnerischen Aufwand zu ermöglichen [Loose 2013, 102ff]. Im Mai 2015 wurde ein neuer Entwurf des Blatt 2 der VDI 4640 herausgegeben. Dieser enthält im Gegensatz zum Blatt aus dem Jahr 2001 weiter aufgeschlüsselte

Auslegungstabellen [E VDI 4640-2:2015-05]. Erdwärmesonden-Anlagen bis 30 kW können hierbei nach Tabellenwerten dimensioniert werden. Die Entzugsleistung von Erdwärmesonden wird für fünf Werte der Jahresvolllaststunden tabellarisch ausgewiesen. Außerdem werden die Leistungen für unterschiedliche Werte der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs, der minimalen Temperatur am Wärmepumpenausstritt bei Maximalleistung und für eine Erdwärmesondenanzahl von bis zu fünf angegeben. Der Entwurf der VDI-Richtlinie ist für die vorliegende Arbeit insofern interessant, als dass die Werte unter bestimmten Voraussetzungen auch für Anlagen zur Raumkühlung herangezogen werden können. Diese sind:

- eine Kühlleistung von maximal 75 % der Heizleistung,
- Jahresvolllaststunden von maximal 300 h/a
- eine direkte/passive Kühlung

Liegen diese Bedingungen nicht vor, sind Berechnungs- oder Simulationsverfahren anzuwenden. Bei Einhaltung hingegen kann die Auslegung anhand der VDI-Tabellen erfolgen.

Die mittlere Länge einer Erdwärmesonde ergibt sich dabei nach folgender Gleichung:

$$l_{\text{EWS}} = \frac{P_{\text{ENT}}}{n_{\text{EWS}} \cdot P_{\text{EWS}}} \quad (2-9)$$

mit l_{EWS} [m] (mittlere) Länge einer Erdwärmesonde
 n_{EWS} [-] Anzahl Erdwärmesonden
 P_{ENT} [W] Wärmepumpenverdampferleistung
 P_{EWS} [W/m] spezifische Erdwärmesondenleistung

2.4.2.2 Energiepfähle

Alternativ zur Herstellung von Erdwärmesonden können Bauteile, wie beispielsweise Gründungspfähle, geothermisch aktiviert werden. Es handelt sich dann um sogenannte Energiepfähle. Führen statische Erfordernisse zu einer Herstellung von Gründungspfählen, bietet sich eine thermische Nutzung derselben an. Die Aktivierung erfolgt üblicherweise, indem Sondenrohre auf der Innenseite des Bewehrungskorbs montiert werden. Ihre Leistung ist zwar gegenüber Erdwärmesonden durch Anzahl und Größe der Gründungspfähle begrenzt, jedoch können aufgrund des größeren Durchmessers eine höhere Zahl an wärmeübertragenden Sondenrohren je Gründungspfahl eingebaut werden als bei einer Erdwärmesonde. Gemäß [Bockelmann et al. 2010, 17f] werden der Arbeits-

aufwand und die Kosten im Vergleich zu Erdwärmesonden geringer eingeschätzt, da keine zusätzlichen Bohrungen erforderlich sind.

Die Gründungspfähle dürfen keine Temperaturen im Frostbereich erreichen, damit die Stabilität der Gründung nicht gefährdet wird. Um dies zuverlässig zu gewährleisten, ist gemäß [E VDI 4640-2:2015-05] eine Sicherheitseinrichtung vorzusehen. Da somit kein Betrieb bei frostnahen Temperaturbedingungen möglich ist, werden die Energiepfähle mit reinem Wasser ohne Beimischung eines Gefrierschutzmittels als Wärmeträgerfluid betrieben.

In Bild 2-12 ist das Prinzip der Bauteilkühlung mittels Energiepfählen zu sehen. Die Sondenrohre sind hier U-förmig in den Pfahlkörper eingebracht. Eine Kombination der Energiepfähle mit einer Wärmepumpe zur Beheizung im Winter ist auch hier sinnvoll.

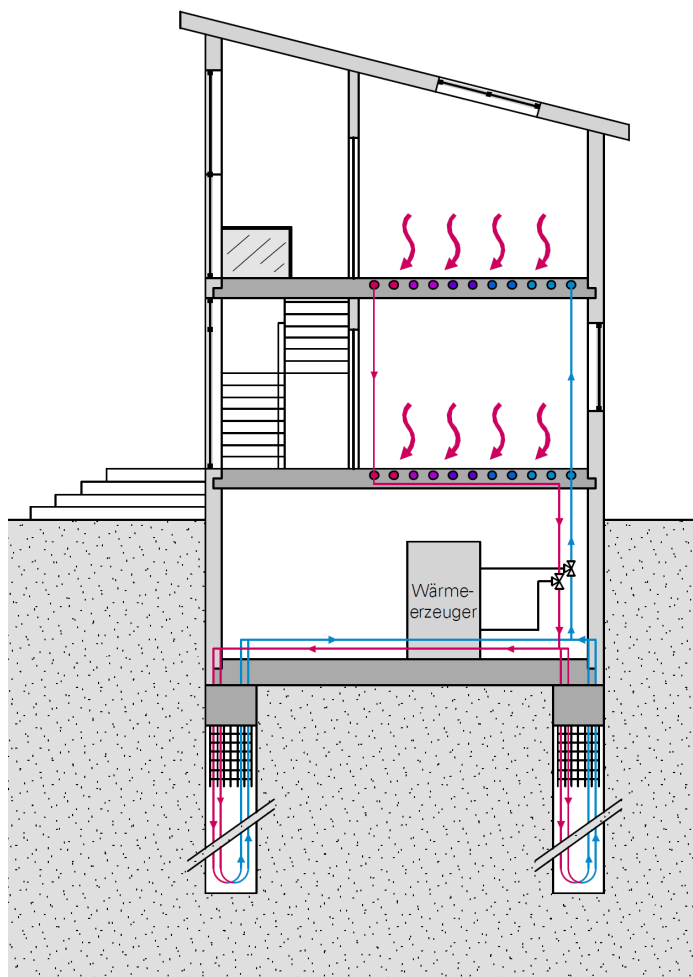


Bild 2-12 Prinzip der Bauteilaktivierung mit Kühlung über Energiepfähle.

Da Energiepfähle in Aufbau und Funktion Erdwärmesonden ähneln, kann ihre Auslegung ähnlich erfolgen. Die Berechnungsverfahren gemäß [E VDI 4640-2:2015-05] gelten jedoch nur, wenn das Verhältnis von Länge zu Durchmesser mindestens

20 und der Pfahldurchmesser maximal 50 cm beträgt. Zudem liegen andere Auslegungs- und Betriebsrandbedingungen vor. So dürfen die Temperaturen in den Energiepfählen wie bereits erwähnt nicht in den Frostbereich gelangen. Wichtige Faktoren bei der Auslegung sind gemäß [E VDI 4640-2:2015-05] die Bodeneigenschaften und Grundwasserströmungen, die Geometrie und Anordnung der Pfähle, der Aufbau der Wärmeübertrager in den Pfählen, die Hydraulik des Geothermiekreises und die Randbedingungen auf der Verbraucherseite. Abhängig von den verwendeten Materialien und den maximal zulässigen Temperaturgradienten, resultierend aus den statischen Anforderungen, muss die Wärmeträgerflüssigkeit gemäß [E VDI 4640-2:2015-05] eine Höchsttemperatur im Kühlbetrieb einhalten. Diese ist mit den zuständigen Behörden abzustimmen.

Die Anzahl, Geometrie und Anordnung der Energiepfähle ergibt sich aus der erforderlichen Gebäudegründung. Statisch nicht notwendige zusätzliche Energiepfähle werden nicht erstellt. Die geplanten Gründungspfähle sind daher so in das Energiekonzept zu integrieren, dass sie einen optimalen Beitrag zur Kühlung bzw. Heizung liefern. Eine Nutzung als Wärmesenke und -quelle ist hilfreich, um ein langfristiges thermisches Gleichgewicht im Erdreich zu gewährleisten, insbesondere wenn kein Grundwasserfluss vorliegt.

2.4.2.3 Sohlplattenkühlung

Eine andere Möglichkeit der geothermischen Aktivierung von Bauteilen stellt die Sohlplattenkühlung dar. Dabei handelt es sich um Rohrregister in oder unterhalb der Bodenplatte, in denen Wasser fließt, welches der Raumluft über eine Bauteilaktivierung in den Geschossdecken Wärme entzieht und diese an das Erdreich abgibt. Dabei darf der Wärmehaushalt des Bauteils nicht gestört werden [Koenigsdorff 2011]. Wird im Winter das unterste Geschoss beheizt, kann die Nutzung als Wärmesenke erschwert werden. Ob sich eine Sohlplattenkühlung trotzdem als sinnvoll erweist, sollte im Zweifel durch thermische Simulationen sichergestellt werden [Bockelmann et al. 2010, 120]. Einen entscheidenden Parameter für die Leistung der Kühlung stellt das Verhältnis von der Sohlplattenfläche zur Fläche der Geschossdecken dar [Hauser 2001]. Der Einfluss des Rohrabstandes wird dagegen als eher gering angegeben, sofern es sich nicht um thermisch hochbelastete Räume handelt [Hauser 2001, 21]. Nach [Maas et al. 2013] können mithilfe einer Sohlplattenkühlung „die sommerlichen Überhitzungsprobleme in Gebäuden bei relativ geringen Zusatzinvestitionen deutlich reduziert werden, ohne dabei nennenswerte Betriebskosten zu verursachen“. Messtechnische Untersuchungen während des Betriebs einer an Rohrregister in der Sohlplatte gekoppelten Fußbodenheizung, wie in [Hauser et al. 2011] für ein

bewohntes Einfamilienhaus dokumentiert, zeigen die Wirkung des Systems. Trotz hoher Außenlufttemperaturen von bis zu 37,5 °C während einer repräsentativen Sommerperiode in 2010 konnten hier die Raumlufthtemperaturen in Kombination mit einer sinnvollen Sonnenschutzbedienung auf unter 26 °C gehalten werden. Das System weist zudem einen geringen Energieaufwand für die Umwälzung des Wassers sowie geringe Mehrinvestitionen bei einem Einsatz im Neubau auf. Ein weiterer positiver Effekt kann die Reduktion der winterlichen Wärmeverluste über das Fundament aufgrund der Erdreicherwärmung im Sommer sein. Nach Einschätzung der Autoren des Beitrags ist ein steigender Einsatz dieser Technologie im Wohnungsbau zu erwarten.

Am Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) kommt eine Kühlung über die Sohlplatte ohne eine winterliche Nutzung zum Einsatz. Die Rohre wurden hier innerhalb der Bodenplatte im unteren Drittel eingebracht. Die Wärmedämmung erfolgte auf der Oberseite der Bodenplatte [Hauser et al. 2002, 62]. Es wurden Messungen im Erdreich in den Jahren 2002 und 2003 vorgenommen, welche erwartungsgemäß zeigen, dass die Veränderungen der Erdreichtemperatur nahe der Bodenplatte (-50 cm) größer sind als in einer Tiefe von 3 m. Während der Winterperiode erholt sich das Erdreich recht gut. Jedoch sind die Temperaturen in der zweiten Kühlperiode gegenüber der ersten leicht erhöht, wodurch ein Aufschaukeln der Temperaturen nicht ausgeschlossen werden kann [Hauser et al. 2004, 113ff]. Die mittlere Leistung der Sohlplattenrückkühlung ergab anhand von Messungen einen Wert von 2,96 kW. Die Wärmeabgabe an das Erdreich unter dem ZUB betrug in zwei gemessenen Kühlperioden 5760 kWh (2002) und 5870 kWh (2003). Anhand der Betriebszeit der Sohlplattenpumpe mit einer Leistung von 250 W wurde eine Leistungszahl der Sohlplattenrückkühlung von 22,8 bestimmt [Hauser et al. 2004, 117].

Ein weiteres Beispielobjekt, welches in [Bockelmann et al. 2010, 95] dokumentiert wird, stellt die VW-Bibliothek in Berlin dar. Hier dient der Bodenabsorber sowohl zur freien Kühlung als auch zur Beheizung mit einer Wärmepumpe. Als Übergabesystem dient eine Betonkernaktivierung. Die freie Kühlung wird bei Bedarf durch eine Kältemaschine mit Rückkühlwerk unterstützt. Die messtechnische Begleitung des Gebäudebetriebs zeigte gegenüber anderen Erdreichsystemen verhältnismäßig hohe oberflächennahe Erdreichtemperaturen, was auf die dichte Bebauung und den hohen Versiegelungsgrad im innerstädtischen Raum zurückgeführt wird. Somit fällt die Leistungsfähigkeit im dokumentierten Beispiel gegenüber den anderen Systemen gering aus.

Zur Auslegung einer Sohlplattenkühlung gibt die [VDI 4640-2:2001-09] keine Richtwerte an. Hier wird eine Berechnung im Einzelfall gefordert. Da die Eigenschaften des Sohlplattenkühlers jedoch in vielen Punkten durch das Gebäude vorgegeben sind, kann eine Dimensionierung ohnehin nicht, wie etwa bei einem in der Gebäudeumgebung platzierten Erdwärmekollektor, stattfinden. Die Größe des Kühlers ist durch die Größe der Bodenplatte begrenzt. Wie auch bei Energiepfählen hängt die Höchsttemperatur der Wärmeträgerflüssigkeit bei Eintritt in die Sohlplatte von den Materialien und den statischen Anforderungen ab.

Die Eigenschaften der Rohre eines Sohlplattenkühlers ähneln einer Bauteilaktivierung im Gebäude. Jedoch sind größere Rohrdurchmesser üblich. Im Zentrum für Umweltbewusstes Bauen kamen beispielsweise Rohrregister mit einem Durchmesser von 25 mm zum Einsatz [Hauser et al. 2004, 29].

Das beschriebene Funktionsprinzip der Sohlplattenkühlung zeigt Bild 2-13.

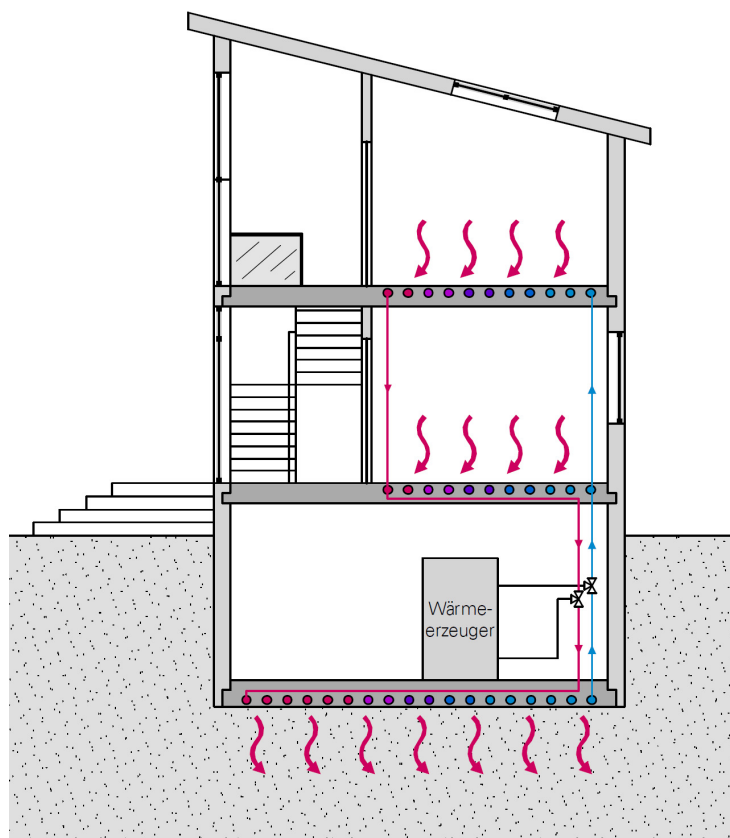


Bild 2-13 Prinzip der Bauteilaktivierung mit Kühlung über die Sohlplatte.

2.4.2.4 Erdwärmekollektoren

Erdwärmekollektoren werden in 1 bis 2 m Tiefe flächig auf dem Grundstück verlegt und nutzen die Erdwärme der oberen Bodenschichten, welche vor allem durch die Witterung beeinflusst werden. Somit wird genau genommen keine Erdwärme sondern Solarenergie genutzt [Stober und Bucher 2012]. Aufgrund des möglichen Einfrierens wird in der Regel ein Wasser-Frostschutz-Gemisch als Wärmeträger-

medium verwendet. Erdwärmekörbe, deren Rohre spiralförmig oder zylindrisch untereinander angeordnet sind, stellen eine andere Bauform dar, funktionieren jedoch nach dem gleichen Prinzip.

Die Entzugsleistung der Erdwärmekollektoren ist aufgrund des hohen Witterungseinflusses üblicherweise geringer als beispielsweise die der Erdwärmesonden. Der Einfluss kann durch Verlegung in einem Grundwasserstrom verringert werden. Entscheidend für die Leistung sind zudem die Eigenschaften des Untergrunds, was bei der Auslegung zu beachten ist [Bußmann 2012].

Das Funktionsprinzip eines Erdwärmekollektors zur Kühlung ist in Bild 2-14 dargestellt.

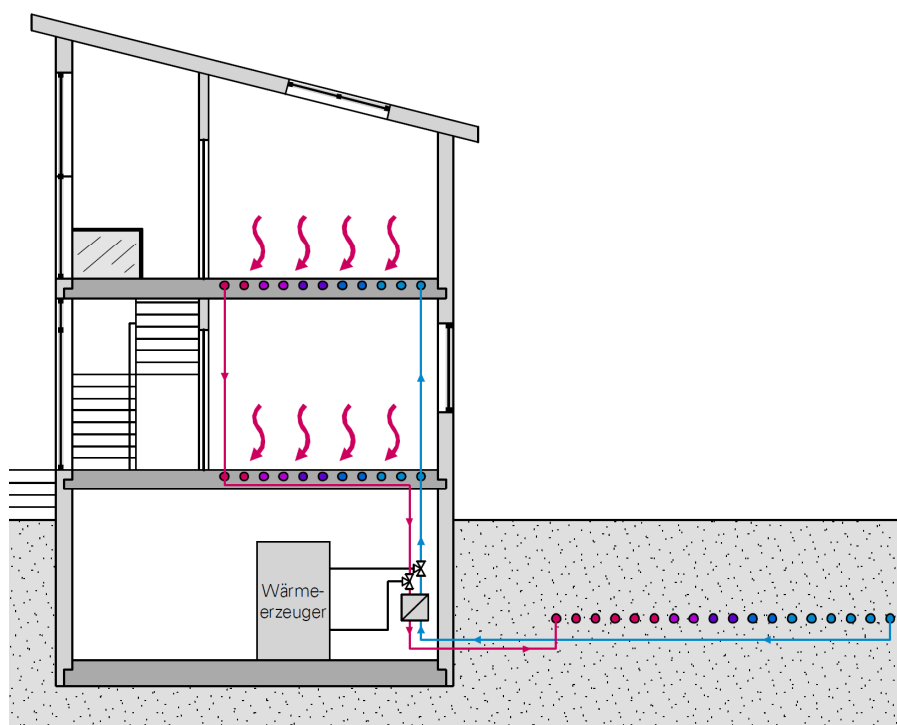


Bild 2-14 Prinzip der Bauteilaktivierung mit Kühlung über einen Erdwärmekollektor.

Nach [Blümel et al. 2002, 27] sollten Erdwärmekollektoren in Verbindung mit einer Bauteilaktivierung so geregelt werden, dass sie über ausreichende Regenerationsphasen verfügen. Denn aufgrund der hohen Wärmespeicherung in den Bauteilen muss der Erdwärmekollektor die anfallende Wärme über einen längeren Zeitraum abführen können, wodurch es ohne gezielte Regelung zu thermischen Ermüdungserscheinungen im Erdreich kommen kann. Im Rahmen eines Forschungsprojekts [Blümel et al. 2002] (bzw. umfassende Darstellung in [Fink et al. 2002]) wurden Parametervariationen zu Erdwärmekollektoren in Kombination mit einer Betonkernaktivierung durchgeführt. Danach sind die wesentlichen Einflussgrößen auf die Leistung der Kollektoren: die Rücklauftemperatur aus den Bauteilen, die Entzugs-

leistung aus dem Erdreich, der Achsabstand, die Betriebszeiten des Kollektors und die Erdreieigenschaften. Eine niedrige Rücklauftemperatur aus der Betonkernaktivierung wirkt sich günstig auf die Leistungsfähigkeit des Kollektors aus. Nach [Blümel et al. 2002, 29] zeigten Simulationsrechnungen, dass bei operativen Raumtemperaturen von 26 °C noch Vorlauftemperaturen in die Betonkernaktivierung von 22 °C erreichbar sind, oberhalb dessen sind die Kühleffekte zu gering. Kühlleistungen eines Erdwärmekollektors werden in [Fink et al. 2002, 115] bei dauerhaftem Betrieb mit maximal 10 W/m² (Verlegefläche), bei feuchtem Erdreich mit Grundwassereinfluss mit maximal 20 W/m² angegeben.

Angaben zur Auslegung von Erdwärmekollektoren finden sich zwar in [VDI 4640-2:2001-09], allerdings lediglich für den Wärmeentzug durch eine Wärmepumpe im Winter. Die Auslegung orientiert sich an der maximalen Verdampferleistung der Wärmepumpe. Dazu sind in der VDI je nach Eigenschaften des Erdreichs und Anzahl der Jahresbetriebsstunden zulässige Wärmeentzugsleistungen von 8 bis 40 W/m² angegeben. Bei längeren Laufzeiten ist zudem die spezifische jährliche Entzugsarbeit zu berücksichtigen. Diese sollte 50 bis 70 kWh/(m²·a) betragen. Die VDI-Richtlinie weist darauf hin, dass bei zusätzlichem Kühlbetrieb im Sommer von diesem Richtwert abgewichen werden kann.

Der Entwurf des Blatt 2 der VDI 4640 aus dem Jahr 2015 enthält weiter aufgeschlüsselte Auslegungstabellen. Da die Witterungsbedingungen aufgrund ihrer geringen Verlegetiefe über einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf Erdwärmekollektoren verfügen, wird bei den maximal zulässigen Entzugsleistungen auch nach Klimazonen differenziert, außerdem nach Erdreieigenschaften und Kollektorart (PE-Rohre oder Kapillarrohrmatten). Eine Ermittlung der Mindestfläche des Kollektors ist anhand der maximal zulässigen flächenspezifischen Entzugsleistung und der Verdampferleistung der Wärmepumpe möglich. Ein Zahlenbeispiel verdeutlicht den Berechnungsvorgang [E VDI 4640-2:2015-05].

2.4.2.5 Brunnensysteme

Brunnensysteme gehören zu den offenen geothermischen Systemen, da sie das Grundwasser direkt ohne ein geschlossenes Rohrsystem nutzen. Eine Tauchpumpe entnimmt dabei Grundwasser aus Förderbrunnen und leitet es nach der thermischen Nutzung über Schluckbrunnen zurück in den Untergrund [Stober und Bucher 2012]. Damit eine thermische Rückwirkung vermieden wird, müssen Förder- und Schluckbrunnen (auch als Dublette bezeichnet) mit ausreichend Abstand und in einer bezogen auf die Grundwasserfließrichtung sinnvollen räumlichen Anordnung platziert werden.

Eine schematische Darstellung eines Grundwasserbrunnens zeigt Bild 2-15. Der blaue Pfeil im Untergrund gibt die Fließrichtung des Grundwassers an.

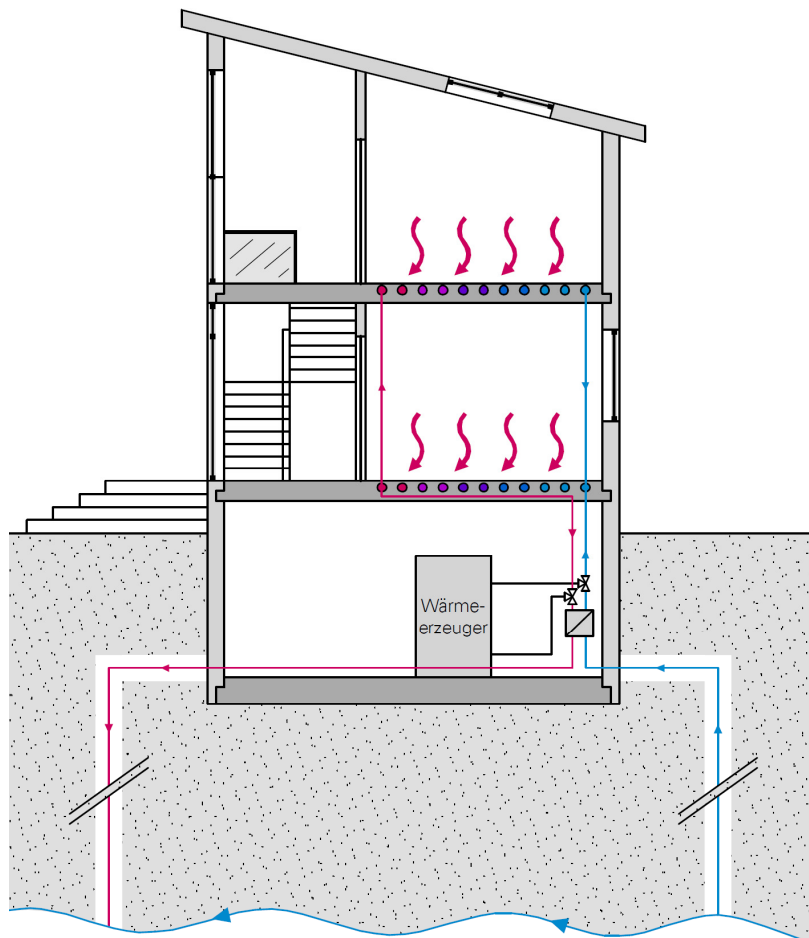


Bild 2-15 Prinzip der Bauteilaktivierung mit Kühlung über einen Grundwasserbrunnen. Rechts: Förderbrunnen, links: Schluckbrunnen.

Für die freie Kühlung stellen Brunnen Systeme in der Regel eine energieeffiziente Lösung dar, da aufgrund des nachströmenden Grundwassers keine thermische Ermüdung zu erwarten ist. Nachteilig sind der erhöhte Hilfsenergiebedarf für die Wasserförderung sowie die Anforderungen an die Wasserqualität und die benötigten Voruntersuchungen [Koenigsdorff 2011]. Zudem wird häufig aufgrund von wasserwirtschaftlichen und umwelttechnischen Gesichtspunkten keine Genehmigung erteilt [Bockelmann et al. 2010, 20].

Die chemischen Eigenschaften des Grundwassers sind von besonderer Bedeutung, da sie Ablagerungen bis hin zu Verstopfungen von Filter und Pumpe auslösen können [Stober und Bucher 2012]. Diese „Verockerung“ durch im Grundwasser gelöste Mineralien und Elemente wie insbesondere Eisen oder Mangan erhöht den Wartungsaufwand und verringert unter Umständen die Lebensdauer der Anlage, da die Ablagerungen schlimmstenfalls zum Ausfall der gesamten Anlage führen können [Loose 2013, 53]. Weist das Wasser Bestandteile

mit pH-Werten im sauren Bereich auf, kann dies zu einer Korrosion der Anlagentechnik führen [Bockelmann et al. 2010, 20].

2.4.3 Kombinierte Kühlung über Außenluft und Erdreich

Bei einem Luft-Erdwärmeübertrager, auch Luft-Erdwärmetauscher (L-EWT) oder Erdkanal genannt, handelt es sich um im Erdreich verlegte Rohre oder Rohrregister, die mit Außenluft durchströmt werden und diese vor dem Eintritt in das Gebäude kühlen oder erwärmen. Die Kühlleistung eines Luft-Erdwärmeübertragers ist zwar begrenzt, jedoch eignet er sich in Kombination mit einer Lüftungsanlage sehr gut als einbruchsichere und schlagregendichte Zuluftführung für die Nachtlüftung. Durch die Vorwärmung der Außenluft im Winter wirkt er außerdem als Frostschutz.

Der Bestand an Forschungsarbeiten im Bereich der Planung von Luft-Erdwärmeübertragern ist relativ umfangreich. Verschiedene Planungshilfen können bei der Realisierung eines erfolgreichen Betriebs dieses Systems unterstützen. Das im Jahr 2004 veröffentlichte Blatt 4 der VDI-Richtlinie 4640 bietet hilfreiche Angaben zur Auslegung, Ausführung und Regelung von Luft-Erdwärmeübertragern. Zudem existieren verschiedene Planungsleitfäden und Handbücher, wie z. B. [Dibowski et al. 2004a] und [Blümel et al. 2001]. Die VDI-Richtlinie weist zwar darauf hin, dass „eine hinreichend genaue Berechnung für die Auslegung und Dimensionierung eines L-EWT nur durch dynamische Simulationsprogramme erreicht werden kann“ [VDI 4640-4:2004-09]. Nach [Dibowski und Wortmann 2002, 18] können für kleine Anlagen jedoch Basisberechnungen für eine überschlägige Auslegung durchgeführt werden.

Für die Verlegung von Luft-Erdwärmeübertragern bieten sich verschiedene Varianten an. So kann die Verlegung frei in den Außenanlagen, unterhalb der Bodenplatte von Gebäuden oder in der Baugrube von unterkellerten Gebäuden erfolgen. Eine Kombination der Varianten ist ebenso möglich. Für eine winterliche Nutzung des Erdwärmeübertragers bietet sich eher die gebäudenahe Verlegung an, da sich das Erdreich hier weniger abkühlt. Liegt der Schwerpunkt jedoch auf dem sommerlichen Betrieb, stellt die freie Verlegung die bessere Wahl dar [Dibowski und Wortmann 2002, 24]. Die Rohre/Rohrregister werden üblicherweise in einer Tiefe von etwa 1,5 m verlegt. Wird das Erdreich beispielsweise wegen eines Kellers ohnehin tiefer ausgehoben, ist ein Verlegen in größerer Tiefe energetisch sinnvoll. Andernfalls wird dies aus Kostengründen vermieden [Dibowski und Wortmann 2002, 12].

Bei der Auslegung von Luft-Erdwärmeübertragern müssen die notwendige Rohrlänge und der entsprechende Rohrdurchmesser bei einem gegebenen Volumenstrom bestimmt werden. Sie hängen von zahlreichen Einflussfaktoren ab, welche gemäß [Dibowski und Wortmann 2002] in vier Bereiche eingeordnet werden können, wie in Tabelle 2-6 zu sehen:

Tabelle 2-6 Aufteilung der Einflussfaktoren für die Auslegung von Luft-Erdwärmeübertragern nach [Dibowski und Wortmann 2002, 11].

A	Konstruktive Einflussgrößen: Verlegetiefe, Verlegeart, Rohrmaterial
B	Erdreichparameter: thermische Bodenkennwerte, Erdfuchte
C	Standort, Wetter, Grundwasser
D	Kosten

Eine Auslegung kleiner Anlagen für Wohngebäude bei Volumenströmen von bis zu 1000 m³/h kann nach [VDI 4640-4:2004-09] erfolgen. Die Dimensionierung der Rohre erfolgt üblicherweise für den Winterfall, da der sommerliche Kühleffekt relativ gering ist und die Anlage vorwiegend zur Vorwärmung der Außenluft bei Lüftungsanlagen dient. Doch gegenüber einer Fensterlüftung bei hohen Außenlufttemperaturen, welche zu einer Aufheizung der Räume führen kann, ist der Luft-Erdwärmeübertrager häufig eine sinnvolle Alternative [Dibowski und Wortmann 2002, 20].

Für größere Anlagen mit Volumenströmen größer 1000 m³/h werden in [VDI 4640-4:2004-09] keine pauschalen Auslegungsdaten angegeben, da die Randbedingungen zur korrekten Berechnung eines Luft-Erdwärmeübertragers zu verschieden sind. Hier wird darauf hingewiesen, dass für eine hinreichend genaue Auslegung ein Simulationsprogramm zu verwenden ist.

Die Effizienz eines Luft-Erdwärmeübertragers kann mithilfe der saisonalen Arbeitszahl β_s bewertet werden. Sie ist das Verhältnis der gelieferten Wärme bzw. Kälte zur aufgenommenen Antriebsenergie bezogen auf den Betrachtungszeitraum. Die Arbeitszahl weist eine deutliche Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit auf. Bei Strömungsgeschwindigkeiten unterhalb von 4 m/s sind nach [Dibowski et al. 2004a, 8] Arbeitszahlen von über 20 erreichbar. Es ist jedoch zu beachten, dass kleine Strömungsgeschwindigkeiten bei vorgegebenem Volumenstrom größere und somit teurere Rohre mit sich bringen. Die Auslegungshilfen der VDI 4640 für Kleinanlagen beruhen auf Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 2 und 4 m/s [VDI 4640-4:2004-09].

In [Blümel et al. 2002] bzw. [Fink et al. 2002] wurden der Einfluss der wesentlichen energetischen Parameter auf einen Luft-Erdwärmeübertrager anhand thermisch-dynamischer Simulationen untersucht und eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Bei den untersuchten Parametern handelt es sich um: Volumenstrom, Rohrlänge, Rohrdurchmesser/-querschnitt, Rohrmaterial, Erdreich Eigenschaften und Verlegetiefe. Als Parameter mit der höchsten Sensitivität stellte sich dabei der Volumenstrom heraus. Somit führt eine Erhöhung des Volumenstroms zu einem höheren Ertrag, jedoch steigen mit ihm auch die Druckverluste und damit der Energiebedarf. Die Länge, Tiefe und Erdreich Eigenschaften stellen ebenfalls Parameter mit erhöhtem Einfluss auf den Ertrag dar. Querschnitt und Rohrmaterial zeichnen sich dagegen durch einen verhältnismäßig geringen Einfluss aus.

Bei Luft-Erdwärmeübertragern findet häufig ein gleichzeitiger Heiz- und Kühlbetrieb in den Übergangszeiten statt, welcher auf eine fehlende Bypassmöglichkeit bzw. ungünstige Regelstrategien zurückzuführen ist, vgl. [Radermacher 2013, 8] nach [Pfafferot et al. 2002] und [Dibowski und Wortmann 2002, 26]. Abhilfe schafft eine Regelung in Abhängigkeit der Außentemperatur anstelle einer zeitgesteuerten Regelung. Letztere führt zu den genannten Überschneidungen und einem erhöhten Energieeinsatz. Voraussetzung für eine Umsetzung der Regelung in Abhängigkeit der Außentemperatur ist das Vorhandensein einer Bypassmöglichkeit, damit die Außenluft zu ungünstigen Zeiten direkt angesaugt statt durch den Luft-Erdwärmeübertrager geführt wird. Der Bypass ist sowohl in den Übergangszeiten (Frühling/Herbst) als auch im Sommer nützlich. In den Übergangszeiten erfolgt eine Einsparung an Heizenergie und Ventilatorstrom, da ein unnötiges Kühlen der Zuluft über den Luft-Erdwärmeübertrager vermieden und sein Druckverlust umgangen wird [Dibowski und Wortmann 2002, 26]. Während des Sommers dient die Bypasseinrichtung der Vermeidung einer Erwärmung der Frischluft im Erdwärmeübertrager in der Nacht. Im Rahmen des Monitoring eines Verwaltungszentrums stellte sich beispielsweise heraus, dass die Zuluft zwar tagsüber über den Erdkanal gekühlt wird, nachts erfolgt jedoch eine Erwärmung der Frischluft um 2 bis 3 K [Schwenk et al. 2016, 40]. Hier kann beispielsweise eine motorische, temperaturgesteuerte Bypassklappe Abhilfe schaffen.

Verfügt das Lüftungsgerät über eine Wärmerückgewinnung (WRG) für den Heizbetrieb, ist auch hier eine Bypassmöglichkeit nützlich. Diese verhindert im Sommerbetrieb, dass sich die durch den Luft-Erdwärmeübertrager abgekühlte Außenluft über die Abluft in der Wärmerückgewinnung unerwünscht aufwärmt. Hierbei ist der Einsatz einer Vierwegeklappe möglich [Dibowski et al. 2004a, 45].

- Sommerbetrieb:
 - Ansaugung über L-EWT, aber Umgehung der WRG
(Nutzung der Kühlung durch L-EWT und Vermeidung einer Erwärmung durch WRG)

in kühlen Nachtstunden:

- Direkte Ansaugung der Frischluft, Umgehung von L-EWT und WRG
(Vermeidung einer Erwärmung durch WRG und L-EWT)

Zur Regelung der Ansaugung im Sommerbetrieb können nach [Dibowski et al. 2004a, 47] außerdem folgende Temperaturgrenzen verwendet werden:

- Bei $\theta_e \leq 18 \text{ °C}$ sollte die Außenluft nicht mehr über den L-EWT sondern direkt angesaugt werden (bei $\theta_e < 18 \text{ °C}$ außerdem ggf. nacherwärmt werden).
- Bei $\theta_e > 18 \text{ °C}$ beginnt der Teillastbetrieb des L-EWT. Ob die Ansaugung über den L-EWT oder direkt erfolgt hängt vom momentanen Kühlbedarf und der Erdreichtemperatur ab.

2.4.4 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Nutzung des Erdreichs

Die relevante technische Regel in Deutschland, die sich mit der Thematik der Nutzung des Erdreichs als Wärmesenke/-quelle befasst, ist die Richtlinienreihe VDI 4640 „Thermische Nutzung des Untergrunds“. Im Blatt 1 der VDI-Richtlinie „Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte“ werden Rechts-, Standort-, Umwelt- und Materialfragen behandelt [Loose 2013, 100].

Da durch geothermische Anlagen die Temperaturen des Grundwassers beeinflusst werden können, kann eine Erlaubnis zur Benutzung des Grundwassers nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) erforderlich sein. Bei einem entsprechenden Antrag ist die maximale Veränderung der Grundwassertemperatur nachzuweisen. Das Blatt 2 der genannten VDI-Richtlinie enthält Richtwerte für die maximale Temperaturveränderung, die in der Regel auch von den Behörden verwendet werden, siehe Tabelle 2-7. Tabelle 2-8 zeigt die Richtwerte der Entwurfsfassung des VDI-Blatts aus dem Jahre 2015.

Tabelle 2-7 Höchstens zulässige Temperaturänderungen des in das Erdreich zurückkehrenden Wärmeträgermediums gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur, bzw. des zurückgeleiteten Grundwassers nach [VDI 4640-2:2001-09], siehe auch [Loose 2013, 100].

	Brunnenanlagen	Erdwärmekollektoren	Erdwärmesonden
Bei Dauerbelastung	± 6 K	± 12 K	± 11 K
Bei Spitzenlast	± 6 K	± 18 K	± 17 K

Tabelle 2-8 Höchstens zulässige Temperaturänderungen des in das Erdreich zurückkehrenden Wärmeträgermediums gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur, bzw. des zurückgeleiteten Grundwassers nach neuem Entwurf des Blatt 2 zu VDI 4640 [E VDI 4640-2:2015-05].

	Brunnenanlagen ¹		Erdwärmekollektoren ²	Erdwärmesonden ³	
	Wärmeentzug	Wärmeintrag		Wärmeentzug	Wärmeintrag
Bei Dauerbelastung	$\theta_{RL} \geq 4 \text{ °C}$	$\theta_{RL} \leq 20 \text{ °C}$	-	$\theta_{RL} \geq 0 \text{ °C}$	+ 15 K
Bei Spitzenlast			-	$\theta_{RL} \geq -5 \text{ °C}$	+ 20 K

¹ gemäß [E VDI 4640-2:2015-05] und [VDI 4640-1:2010-06]: die Werte für die zulässige Rücklaufemperatur des Grundwassers gelten für Wärmeentzug einerseits und Wärmeinleitung andererseits, im Einzelfall sind kurzzeitige (max. 30 Tage im Jahr) Erwärmungen auf max. 25 °C zulässig.

² Im Entwurf der VDI 4640 Blatt 2 finden sich für Erdwärmekollektoren zwar keine Angaben zu einer maximal zulässigen Temperaturänderung, jedoch werden die maximale flächenspezifische Entzugsleistung und Jahresentzugsarbeit mit zugehörigen Rohrabständen für verschiedene Standortbedingungen bestimmt, bei denen „weder die Umwelt negativ beeinflusst noch die Wärmepumpenanlage beschädigt wird“ [E VDI 4640-2:2015-05].

³ gemäß [E VDI 4640-2:2015-05] werden für den Wärmeentzug von Erdwärmesonden Mindestwerte für die Rücklaufemperatur (bzw. Eintrittstemperatur in die Erdwärmesonde) und für den Wärmeintrag maximal zulässige Temperaturänderungen angegeben.

Sind für eine geothermische Anlage Bohrungen notwendig, so sind diese mit anerkannten Bohrverfahren und entsprechend qualifizierter Bohrmannschaft durchzuführen [Loose 2013, 100]. Zu beachten sind auch die Wassergesetze der Länder. Sind ein Freilegen von Grundwasser oder Auswirkungen auf das Grundwasser zu erwarten, müssen die Arbeiten bei der Wasserrechtsbehörde nach § 35 WHG in Verbindung mit den landesgesetzlichen Regelungen zumindest angezeigt werden [VDI 4640-1:2010-06].

Ab einer Tiefe von 100 m kommt bei geothermischen Anlagen eine bergrechtliche Genehmigungspflicht hinzu. Da solch ein Genehmigungsverfahren aufwändig ist, wird bei der freien Kühlung über das Erdreich häufig lediglich das Erdreich bis zu Tiefen von 100 m genutzt [Loose 2013, 7], [VDI 4640-1:2010-06].

Weiterführende Informationen zu den rechtlichen Rahmenbedingungen von Erdwärmesonden in Hessen liefert der Leitfaden „Erdwärmennutzung in Hessen“, herausgegeben vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie [Rumohr et al. 2017]. Neben allgemeinen Informationen zur Funktionsweise von Erdwärmesonden und anderer Erdwärmesysteme, werden Hinweise zur Dimensionierung, zur Standortbeurteilung und zum Ablauf eines Erlaubnisverfahrens von Erdwärmesonden gegeben.

2.4.5 Einfluss der Untergrundeigenschaften

Die hier vorgestellten Systeme zur Kühlung nutzen den oberflächennahen Untergrund, nachfolgend vereinfachend als Erdreich bezeichnet. Dieses wird bereits in 10 bis 20 m Tiefe von jahreszeitlichen Temperaturschwankungen kaum mehr beeinflusst und weist somit in etwa das langjährige Temperaturmittel,

welches an der Erdoberfläche vorliegt, auf [Stober und Bucher 2012, 33]. Die Effizienz der Nutzung des Erdreichs als Wärmesenke weist eine hohe Abhängigkeit von den thermischen Materialeigenschaften von Boden und Fels auf.

Für jegliche Nutzung des Erdreichs ist daher eine Voruntersuchung der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten vor Ort sinnvoll, um die Anlagen korrekt auslegen zu können. Die Materialeigenschaften von Boden und Fels bestimmen den Transport und die Speicherung von Wärme und Wasser. Hierzu gehören die thermischen Eigenschaften, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, sowie geohydraulische Eigenschaften, wie Porosität und Permeabilität. Hinzu kommen physikalische Eigenschaften wie Dichte, Viskosität und Kompressibilität [Stober und Bucher 2012, 10]. Tabelle 2-9 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Untergrundeigenschaften, welche die Wirkungsweise der Nutzung als Wärmesenke beeinflussen.

Tabelle 2-9 Einflussfaktoren auf die Auslegung geothermischer Anlagen nach [Bockelmann et al. 2010, 33].

	Einflussfaktoren
boden- bzw. felsmechanisch	<ul style="list-style-type: none"> ○ Wassergehalt ○ Dichte, Porengehalt ○ Durchlässigkeit ○ Quell- und Schrumpfverhalten ○ Frost-/Tauverhalten ○ Scherparameter ○ Spannungs-/Verformungsverhalten
thermisch	<ul style="list-style-type: none"> ○ Wärmeleitfähigkeit (abhängig von Sättigungsgrad und Porenanteil) ○ Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur des Bodens
geohydraulisch	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tiefe und Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels ○ Grundwasserströmung, Fließgeschwindigkeit
mineralisch, chemisch	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mineralgehalt ○ Ionenaustauschvermögen

Voraussetzung für die Auslegung geothermischer Anlagen ist die Kenntnis der Erdreichparameter Dichte (ρ), Wärmeleitfähigkeit (λ) und spezifische Wärmekapazität (c).

Die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität werden üblicherweise in Baugrund- und Gründungsgutachten für Bauvorhaben nicht angegeben, sodass für geothermische Voruntersuchungen häufig Abschätzungen vorgenommen werden [Dibowski und Wortmann 2002, 12]. Liegen zunächst keine Messwerte vor, können Werte für Wärmeleitfähigkeit und volumenbezogene spezifische Wärmekapazität ($\rho \cdot c$) der Tabelle 1 in [VDI 4640-1:2010-06] entnommen werden. Ursachen für die relativ große Bandbreite dieser Kennwerte können nach [Stober und Bucher 2012, 10] in einer Varianz in der mineralogischen Zusammensetzung,

einem unterschiedlichen Kompaktions- oder Alterungsgrad oder einer Schichtung des Gesteins liegen. Insbesondere hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit sind große Bandbreiten vorzufinden – so schwankt beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit von Kies/Steinen in wassergesättigter Form zwischen 1,6 und 2,5 W/(m·K) [VDI 4640-1:2010-06]. Im Allgemeinen lässt sich festhalten, dass kristalline Festgesteine eine 2- bis 3-mal höhere Wärmeleitfähigkeit besitzen als Lockergesteine, wie Kiese und Sande. Die Höhe des Grundwasserspiegels hat Auswirkungen darauf, ob die Bodenporen im Lockergestein bzw. Klüfte im Festgestein mit Wasser oder Luft gefüllt sind. Während die Wärmeleitfähigkeit von trockenem Sand bei nur ca. 0,3 W/(m·K) liegt, sind im wassergesättigten Zustand Wärmeleitfähigkeiten von bis zu 1,9 W/(m·K) möglich [Stober und Bucher 2012, 10f], [VDI 4640-1:2010-06].

Die Wärmeleitfähigkeit bestimmt die Höhe des Wärmestroms aufgrund Wärmeleitung im Erdreich. Daneben bestimmt die spezifische Wärmekapazität (in J/(kg·K)), wie viel Wärme im Erdreich gespeichert werden kann, also wieviel Wärmeenergie pro Masseneinheit notwendig ist, um die Temperatur eines Körpers um 1 K anzuheben. Bei einem Bezug auf das Volumen wird von der Wärmespeicherzahl (s) bzw. von der volumenbezogenen spezifischen Wärmekapazität ($\rho \cdot c$) gesprochen ($s = \rho \cdot c$, in J/(m³·K)). Feste Gesteine verfügen über spezifische Wärmekapazitäten zwischen 0,75 und 1 kJ/(kg·K), während Wasser einen 4-6-fach höheren Wert von 4,19 kJ/(kg·K) aufweist. Bezogen auf das Volumen kann Wasser jedoch nur etwa doppelt so viel Wärme speichern wie Festgesteine [Stober und Bucher 2012, 11f].

Für die endgültige Planung einer Anlage sind die Materialeigenschaften durch Labor- oder Feldversuche zu bestimmen. Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit, der Wärmekapazität und der Rohdichte des Untergrunds stehen verschiedene Messmethoden zur Verfügung, wie beispielsweise in [Stober und Bucher 2012, 14f] dokumentiert ist.

Für die Auslegung von Erdwärmesonden kommt häufig der (Geo-)thermal Response Test (TRT) zum Einsatz. Dieser ist ein In-situ-Testverfahren zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften des Untergrunds und der Wärmeübertragungseigenschaften der im Boden eingebauten Erdwärmesonde. Dabei erfolgt eine Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit über die gesamte Länge einer Sonde und des Wärmedurchgangswiderstands vom Fluid an den Untergrund für die eingesetzte Sondenkonstruktion [VDI 4640-5:2016-08]. Die Messung erfolgt, indem „eine definierte Wärmeleistung an eine Erdwärmesonde angelegt und die Temperaturentwicklung des Wärmeträgermediums am Sonderein- und austritt über die Zeit gemessen“ wird [VDI 4640-5:2016-08, 3]. Mithilfe eines mathe-

matischen Modells werden anschließend die thermischen Parameter ermittelt. Weiterführende Informationen enthält das Blatt 5 der VDI-Richtlinie „Thermische Nutzung des Untergrunds – Thermal Response Test“. Hier sind auch verschiedene erweiterte Methoden und ergänzende Messungen zum TRT dokumentiert. Üblicherweise kommen Thermal Response Tests für größere Projekte, bei denen eine hohe Anzahl an Erdwärmesonden vorgesehen ist, zum Einsatz. Für Einzelobjekte sind diese Tests in der Regel zu aufwendig [Stober und Bucher 2012, 81ff].

2.5 Voraussetzungen und Grenzen passiver Kühlsysteme

Im Gegensatz zur aktiven Kühlung ist die erreichbare Kühlleistung passiver Systeme beschränkt. Um dennoch ein moderates Temperaturniveau zu schaffen, sollte daher gemäß [Pfafferot 2003] ein täglicher Kühlenergiebedarf von 150 Wh/(m²·d) nicht überschritten werden.

Weiterhin spielt die wirksame Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes eine große Rolle. Um die tagsüber anfallende Wärmeenergie zu puffern, sollten die Bauteile ausreichend schwer ausgebildet sein. Ist eine schwere Ausführung nicht möglich, können Phasenwechselmaterialien aushelfen. Dies ist insbesondere im Bestand relevant oder in Nichtwohngebäuden, welche häufig eine leichte Bauweise aufweisen bzw. deren schwer ausgeführte Decken, beispielsweise durch abgehängte Konstruktionen für technische Installationen, für die Luftzirkulation unzugänglich sind.

Möglichkeiten der wirksamen Belüftung tagsüber sowie nachts sollten gegeben sein, um ein Abführen der in den Bauteilen gespeicherten Wärme zu erzielen. Dabei sollte die Außentemperatur pro Nacht mindestens 5 Stunden unterhalb von 21 °C liegen. Die Bedingungen hierfür sind in Mitteleuropa üblicherweise günstig. Der nächtliche Luftwechsel sollte etwa 2 h⁻¹, besser 4 h⁻¹ betragen [Pfafferot 2003]. Um diesen auf natürliche Weise zu erreichen, muss eine Gebäudedurchströmung ermöglicht werden. Diese kann mittels einer Nutzung des thermischen Auftriebs erreicht werden, beispielsweise durch Atrien oder Schächte. Dabei müssen eine gute Außenluftqualität und ein Schutz gegen Außenlärm – falls vorhanden – sichergestellt sein.

Ist die natürliche Nachtlüftung beispielsweise durch Sicherheitsprobleme nicht möglich, kann auf eine mechanische Lüftung zurückgegriffen werden. Der erreichbare Luftwechsel ist hier jedoch vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit auf etwa 4 h⁻¹ begrenzt [Zimmermann 2003], vgl. Kapitel 2.3.1.

Im Allgemeinen ist eine ganzheitliche integrale Planung für ein erfolgreiches Zusammenspiel aller Komponenten anzustreben. Ein sinnvolles Nutzerverhalten

und eine Einweisung des Nutzers in das jeweilige Kühlsystem sind zudem Voraussetzung dafür, dass die erwarteten positiven Effekte erreichbar sind.

Eine Übersicht der Voraussetzungen und Grenzen passiver Kühlsysteme ist in nachfolgender Tabelle gegeben:

Tabelle 2-10 Übersicht der Voraussetzungen und Grenzen passiver Kühlsysteme, vgl. [Fink et al. 2002], [Pfafferot 2003], [Dibowski und Wortmann 2002, 21].

System	Voraussetzungen	Grenzen
Nachtlüftung	<ul style="list-style-type: none"> ○ schwere Bauart und Zugänglichkeit massiver Bauteile für Luftzirkulation sinnvoll ○ nachts $\theta_e \leq 21 \text{ °C}$ an über 5 h ○ $n \geq 2 \text{ h}^{-1}$ ○ gute Außenluftqualität ○ Schutz gegen Außenlärm und Abgase in unteren Geschossen ○ natürliche Lüftung: Gebäudedurchströmung baulich ermöglichen; Schutz vor Witterung; Gefahr des Einbruchs ausschließen 	<ul style="list-style-type: none"> ○ natürliche Lüftung: $n \leq 10 \text{ h}^{-1}$ (bei Nutzung des thermischen Auftriebs), bei hohem Außenlärm und Einbruchrisiko eingeschränkt nutzbar ○ mechanische Lüftung: $n \leq 4 \text{ h}^{-1}$ (darüber unwirtschaftlich aufgrund des hohen Hilfsenergiebedarfs) ○ Brandschutzauflagen
adiabate Kühlung	<ul style="list-style-type: none"> ○ möglichst niedrige Feuchtigkeit der Außenluft (in warm-feuchten Gebieten auszuschließen) ○ niedrige Feuchteproduktion im Raum 	<ul style="list-style-type: none"> ○ bei zu hoher Luftfeuchtigkeit beschränkte Kühlleistung ○ Abkühlung der Außenluft bis zu etwa 10 K möglich
freie Erdreichkühlung	<ul style="list-style-type: none"> ○ Voruntersuchung des Erdreichs: Wärmeleit-, Wärmespeicherfähigkeit und Rohdichte ○ Genehmigungsverfahren beachten ○ je nach System ausreichend unversiegelte Freifläche notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> ○ je nach Bodenbeschaffenheit ist eine Erwärmung des Erdreichs nach und nach möglich (sinnvoll: Regeneration durch winterliche Nutzung) ○ Temperaturprofil des Bodens bestimmt die Wirksamkeit der Wärmesenke ○ je nach Tiefe der Wärmesenke erhöhte Witterungseinflüsse und somit erhöhte Abhängigkeit von Klimaverhältnissen
Rückkühlwerk	<ul style="list-style-type: none"> ○ Bauteilaktivierung als Übergabesystem ○ ausreichend Platz im Außenbereich (Dach/Fassade) ○ Aerosole dürfen nicht in die Raumluft gelangen - Aufstellung i.d.R. nicht im Keller möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Kühlleistung begrenzt, bei Trockenkühlung maßgeblich von Außentemperatur abhängig ○ bei Nasskühlung höhere Kühlleistung möglich
Bauteilaktivierung	<ul style="list-style-type: none"> ○ schwere Bauart und Zugänglichkeit massiver Bauteile für Luftzirkulation sinnvoll ○ niedrige solare Lasten, guter Sonnenschutz ○ niedrige interne Lasten 	<ul style="list-style-type: none"> ○ träges System: keine zügige Temperaturregelung möglich ○ Wärmelast bis max. 50-80 W/m² [Fink et al. 2002, 54] ○ max. Kühlleistung abhängig von der Wärmesenke ○ Unterschreiten des Taupunkts an der Bauteiloberfläche vermeiden

3 Simulationsumgebung und Modellaufbau

3.1 Beschreibung der eingesetzten Software TRNSYS

Bei der Software TRNSYS („Transient System Simulation“) handelt es sich um ein modular aufgebautes, dynamisches Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm. Obwohl ursprünglich für die Simulation thermischer Solaranlagen entwickelt, bietet die Software mittlerweile für zahlreiche Anlagenkomponenten Berechnungsmodule (sogenannte „Types“) an, die individuell konfiguriert und verknüpft werden können. So verfügt die Software über eine große Standard-Komponentenbibliothek, welche durch zu erwerbende Zusatzkomponenten, sogenannte „NoStandard-Types“, erweitert werden kann. Für die Simulation spezieller, z. B. erdreichgekoppelter Systeme existieren einige „NoStandard-Types“ für TRNSYS. Zudem ist es möglich, eigene Types zu programmieren und in TRNSYS einzubinden. TRNSYS hat gegenüber anderen Simulationsprogrammen den großen Vorteil, dass alle benötigten Types in einem „Deckfile“ gemeinsam mit sämtlichen Gebäude-Komponenten kombiniert werden können. Das Programm besitzt somit einen außerordentlich hohen Freiheitsgrad. Weitere Zusatzkomponenten wurden von der Firma TESS entwickelt. Die TESS-Libraries beinhalten eine umfangreiche Auswahl an verschiedensten Komponenten unterschiedlicher Komplexität, verfügen jedoch nicht immer über eine Dokumentation.

Auch für die thermisch-dynamische Simulation von Gebäuden beinhaltet TRNSYS einen Type: das Gebäudemodul – der Type 56 – kann über die eigene Oberfläche „TRNBuild“ nutzerfreundlich bedient und mit zahlreichen Anlagenkomponenten kombiniert werden. Der Type 56 beinhaltet eine komplexe Modellierung transparenter Bauteile. Die charakteristischen Größen von Fenstern können durch das Tool WINDOW [LBNL] vorab berechnet und dem Type 56 zur Verfügung gestellt werden. Das Tool berücksichtigt spektrale Daten der Einzelscheiben und Mehrfachreflexionen zwischen den Scheiben. Type 56 ermittelt schließlich „für den aktuellen Sonnenstand durch Interpolation die resultierende Transmission und Reflexion sowie die Absorption jeder einzelnen Scheibe für den direkten Anteil der Sonneneinstrahlung im visuellen und nicht visuellen Wellenlängenbereich“ [Hiller und Schulz 2015, 361]. Die Erstellung eigener Fensterkennwerte mit dem WINDOW-Tool erweist sich als schwierig. Das Erlangen eines bestimmten Zielkennwertes ist aufwendig, da zahlreiche Einstellungen zu justieren sind und sämtliche Glas- und Gaseigenschaften, Scheibenabstände und -dicken sowie Rahmenparameter bekannt sein müssen. Um den Schritt der Modellierung mit WINDOW zu umgehen, ist es möglich die Fenster-Bibliothek des Types 56 zu verwenden. Diese beinhaltet zahlreiche Glascharakteristika. Im TRNSYS-Standard-

paket (Version TRNSYS 17) sind wenige in Deutschland übliche Wärmedurchgangskoeffizienten und Gesamtenergiedurchlassgrade zu finden. Eine Fensterdatenbank mit aktuellen Verglasungsprodukten der wichtigsten deutschen Hersteller, welche anhand spektral aufgelöster Herstellerdaten generiert wurde, kann jedoch zusätzlich erworben werden [Transsolar o. J.]. Für TRNSYS 18 wird zudem ein Add-On für die Modellierung komplexer Verglasungssysteme (CFS) angeboten [Transsolar 2018].

Die Modellierung des Wärmedurchgangs durch Bauteile erfolgt in TRNSYS anhand der sogenannten Transferfunktionsmethode (TFM) nach [Mitalas und Arseneault 1972]. Dies ist ein Verfahren, welches zur Berechnung der instationären eindimensionalen Wärmeleitung durch Bauteile entwickelt wurde und gegenüber anderen Methoden wie z. B. der Finite-Differenzen-Methode eine verkürzte Rechenzeit aufweist. Es bedient sich sogenannter Transferfunktionskoeffizienten (conduction transfer function (CTF) coefficients) oder Gewichtsfaktoren, welche in einem vorgelagerten Präprozess numerisch durch TRNBuild bestimmt werden [Wimmer 2004], [Delcroix et al. 2013]. In diesem vorgelagerten Schritt werden vier Transferkoeffizienten einmalig bestimmt, welche das dynamische Verhalten des Bauteils charakterisieren. Die Methode der Transferkoeffizienten kann im Falle schwerer und hochgedämmter Bauteile, bei denen eine höhere „Zeitbasis“ zur Berechnung der Koeffizienten verwendet werden muss, zu Ungenauigkeiten führen, was vorwiegend bei Analysen mit kurzen Laufzeiten problematisch ist. Aus diesem Grund wurde in [Delcroix et al. 2013] eine Optimierung der Methode untersucht und diese in TRNSYS implementiert.

Um die Wärmeübertragung über wassergeführte Bauteile zu simulieren, kann der NoStandard-Type 360 „Floor heating and hypocaust“ an das Gebäudemodell gekoppelt werden. Dieser Type bedient sich der Finite-Differenzen-Methode und wurde ursprünglich für die Berechnung einer Fußbodenheizung entwickelt, später jedoch um die Möglichkeit der Abbildung einer luftgeführten Hypokaustenheizung erweitert [Fort o. J.]. Auch die Nutzung als Kühlung ist problemlos möglich. Da die geometrischen und materialspezifischen Daten in einem individuellen File definiert werden, besteht ein sehr hoher Freiheitsgrad bei der Baukonstruktion. Das aktivierte Bauteil wird modelliert, indem es in einzelne Segmente eingeteilt wird, welchen ein Gitter mit bis zu 50 Knoten („Nodes“) zugeordnet werden kann. Für jeden Knoten müssen die jeweiligen Materialeigenschaften, Abmessungen und die Position im Segment festgelegt werden.

3.2 Möglichkeiten der Modellierung erdgekoppelter Systeme mit TRNSYS

Grundsätzlich hängt die Qualität eines Erdreichmodells vom Detaillierungsgrad des numerischen Gitters und den Randbedingungen ab. Hier beinhalten die von TRNSYS mitgelieferten Standardkomponenten wenig zufriedenstellende Lösungen. Eine realistische Temperaturrandbedingung für erdberührte Bauteile lässt sich schwer definieren, da das Erdreich in TRNSYS üblicherweise als ungestört betrachtet wird. Ein Einfluss der Erdreichtemperatur durch das Gebäude selbst kann mithilfe der Standardkomponenten nicht abbildet werden. Eine Ermittlung der Erdreichtemperatur lässt sich vereinfachend mit dem Type 77 „simple ground temperature model“ durchführen. Dieser ermittelt abhängig von der mittleren Außentemperatur des Standorts, der Amplitude der Außentemperatur (Differenz zwischen maximaler und gemittelter Außentemperatur) sowie den Erdreicheigenschaften eine Temperaturkurve für frei wählbare Erdreichtiefen nach [Kusuda und Achenbach 1965]. Je tiefer sich der gewählte Punkt im Erdreich befindet, desto mehr nähert sich die Erdreichtemperatur der mittleren Außentemperatur an. Bereits bei einer Tiefe von 10 m schwankt die Erdreichtemperatur nur noch geringfügig und ist somit nahezu unabhängig vom Jahresgang der Außentemperatur. Dies entspricht Ausführungen der Literatur, wie z. B. [Stober und Bucher 2012]. Für eine Simulation von Systemen, welche die tiefe Geothermie nutzen, ist dieser Type hingegen ungeeignet, da keine Erwärmung in tiefen Schichten berücksichtigt wird. Die bereits angesprochene Problematik, den Einfluss der Bebauung mit in die Berechnungen einzubeziehen, fehlt auch dem Type 77. Eine weitere erdreichabbildende Komponente stellt der Type 49 „Multizone Slab on Grade“ dar, welcher die Wärmeübertragung aus den Bodenplatten eines mehrzonigen Gebäudes in das Erdreich anhand eines 3-dimensionalen Finite-Differenzen-Modells berechnet. Erdberührte Bauteile eines Kellerraums sind nicht modellierbar, da ausschließlich ebenerdige Bodenplatten abgebildet werden. Zudem wird auch hier angenommen, dass die Temperatur der Erdreioberfläche nicht durch die Präsenz des Gebäudes beeinflusst wird [Transsolar 2014a, 237].

Für einige erdgekoppelte Systeme können die NoStandard-Types sowie die TESS-Types eine Lösung darstellen. Der TESS-Type 1244 „Multizone Basement Model“ verspricht beispielsweise eine Modellierung des Erdreichs mit Einfluss durch das Gebäude. Die Modellierung des Erdreichs erfolgt dabei nach der Finite-Differenzen-Methode. Allerdings ist der Type mit einer sehr hohen Rechenzeit verbunden und der Einfluss des Gebäudes auf den Temperaturverlauf erweist sich als auffällig gering (vgl. Kapitel 3.5.3).

Für die Einbindung von Erdwärmesonden können z. B. der TESS-Type 557 oder der NoStandard-Type 451 „Vertical Borehole Heat Exchanger, EWS Model“ verwendet werden. Das entwickelte Simulationsmodul des Type 451 ist ausführlich in [Huber und Schuler 1997] beschrieben. Die Erdwärmesonden werden in ein axial-symmetrisches Rechengitter aufgeteilt. Das Modell ist in der Lage, bis zu acht verschiedene, vertikale Schichten mit unterschiedlichen Bodeneigenschaften abzubilden. Der Type wurde mit messtechnischen Untersuchungen verglichen und validiert – sowohl für das Kurzzeit- als auch für das Langzeitverhalten. Jeder Type bildet eine Doppel-U-Sonde ab und kann beliebig angeordnet werden [Huber und Schuler 1997].

Die Abbildung eines Erdkanals kann anhand des NoStandard-Types 460 „Hypocaust (air-to-soil exchanger)“ erfolgen. Dieser bildet einen Block von rechteckig angeordneten Erdknoten ab, welche mehrere ebenfalls rechteckige horizontal angeordnete Rohre, die mit Luft durchströmt werden, beinhalten. Rohre mit einem kreisförmigen Querschnitt werden durch einen Korrekturfaktor berechnet. Jedem einzelnen Knoten können individuelle Bodeneigenschaften zugewiesen werden.

Ein horizontaler Erdwärmekollektor kann mithilfe des Type 710 simuliert werden. Das Berechnungsmodell dieses Types beruht auf zweidimensionaler Wärmeleitung im Erdreich und einer instationären Energiebilanz für die Kopplung mit dem Wärmeträgerfluid, welche jeweils mit expliziten Finite-Differenzen-Verfahren gelöst wurden. Zudem kann der Type den Phasenwechsel durch Eisbildung und die damit verbundene Änderung der Wärmekapazität des Erdreichs berechnen. Die Modellgenauigkeit wurde durch die Entwickler anhand von Messungen überprüft [Hirsch et al. 2016] und [Janßen und Hirsch 2016].

Grundwasserströmungen im Erdreich, welche sich positiv auf die Leistung einiger Systeme auswirken können, kann TRNSYS nicht abbilden. Sollen diese berücksichtigt werden, müssen andere Simulationsprogramme wie z. B. FEFLOW hinzugezogen werden.

3.3 Plausibilitätsprüfung

3.3.1 Vergleichsrechnungen anhand des Prüfraums nach DIN EN ISO 13791

Die Simulationsoberfläche von TRNSYS bietet eine hohe Bandbreite an Eingabeparametern, die zwar die Freiheit des Anwenders erhöhen, doch gleichzeitig die Zahl möglicher Fehlerquellen. Über eine Plausibilitätsprüfung erfolgt eine Minimierung dieser Unsicherheit.

Im Rahmen der Plausibilitätsprüfung werden Berechnungen auf Basis des Prüfraums mit der Geometrie A nach [DIN EN ISO 13791:2012-08] durchgeführt. In Bild 3-1 sind die Abmessungen des Prüfraums zu sehen.

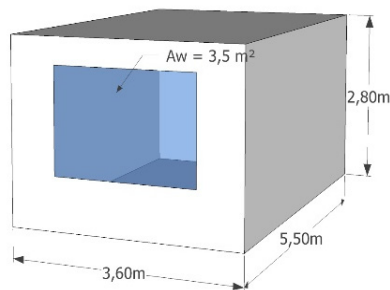


Bild 3-1 Geometrie A des Prüfraums nach [DIN EN ISO 13791:2012-08], eigene Darstellung.

Auch die Berechnungen im Rahmen einer an der Universität Kassel vorangegangenen Dissertation beruhen auf diesem Prüfraum [Schlitzberger 2014]. Zur Plausibilitätsprüfung werden Berechnungsergebnisse für einen Basisfall mit den Ergebnissen nach [Schlitzberger 2014], welche mit dem Programm HAUSer basierend auf [Hauser 1977] simuliert wurden, verglichen. Der Basisfall verfügt über folgende Randbedingungen:

- Zentralraum (Raum mit nur einer Außenwand, alle anderen raumumschließenden Bauteile werden als adiabatisch betrachtet) gemäß Bild 3-1, jedoch mit einem Fensterflächenanteil von 50 %
- Konstruktionen gemäß [DIN EN ISO 13791:2012-08] und [Schlitzberger 2014], mittlere Bauart
- Wärmeschutzniveau: Referenzgebäude EnEV 2009
- Klimaregion B (TRY 04 Potsdam)
- Wohnnutzung gemäß [DIN 4108-2:2013-02] (Interne Wärmeeinträge $100 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; durchgängige Nutzungszeit; Grundluftwechsel: $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$; ideale Heizung mit $\theta_{i,\text{soll}} \geq 20 \text{ °C}$)
- Steuerung Sonnenschutz automatisch (Norden Grenzbestrahlungsstärke $200 \text{ W}/\text{m}^2$; andere Orientierungen Grenzbestrahlungsstärke $300 \text{ W}/\text{m}^2$)
- Keine Kühlung
- Wärmeübergangswiderstände:
HAUSer: konstante Wärmeübergangswiderstände nach [DIN EN ISO 6946:2008-04];
TRNSYS: konstante *konvektive* Wärmeübergangskoeffizienten nach [DIN EN ISO 6946:2008-04], radiative Anteile nicht einstellbar

3 Simulationsumgebung und Modellaufbau

- Fall 1: Erhöhte Taglüftung ($n = 3 \text{ h}^{-1}$), erhöhte Nachtlüftung ($n = 2 \text{ h}^{-1}$) (gemäß [DIN 4108-2:2013-02])
- Fall 2: Erhöhte Taglüftung ($n = 3 \text{ h}^{-1}$), ohne Nachtlüftung (gemäß [DIN 4108-2:2013-02])

In Bild 3-2 sind die Übertemperaturgradstunden der beiden Programme bei erhöhter Nachtlüftung (Fall 1) zu sehen. Bild 3-3 zeigt die Ergebnisse bei fehlender Nachtlüftung (Fall 2).

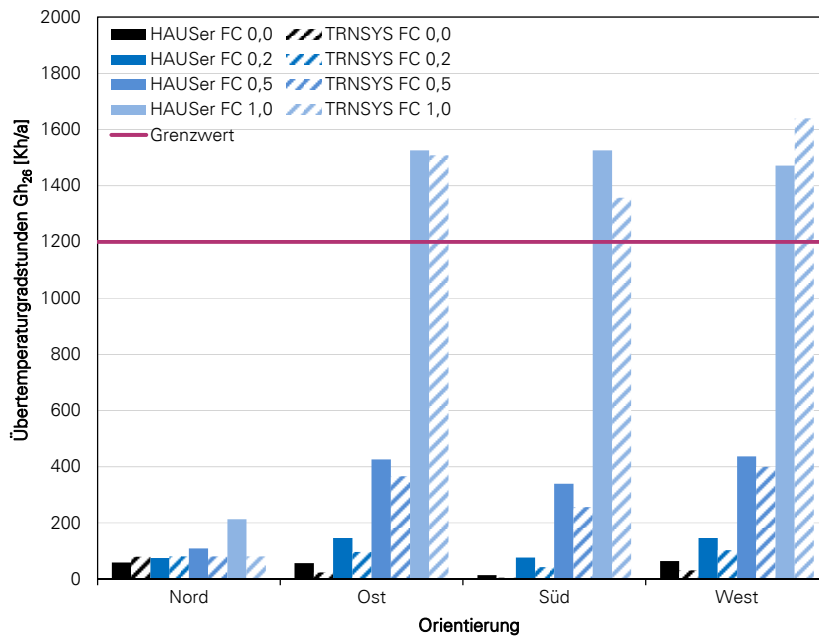


Bild 3-2
Gegenüberstellung der Übertemperaturgradstunden für verschiedene Abminderungsfaktoren des Sonnenschutzes F_C und Orientierungen mit den Programmen HAUSer und TRNSYS bei erhöhter Nachtlüftung.

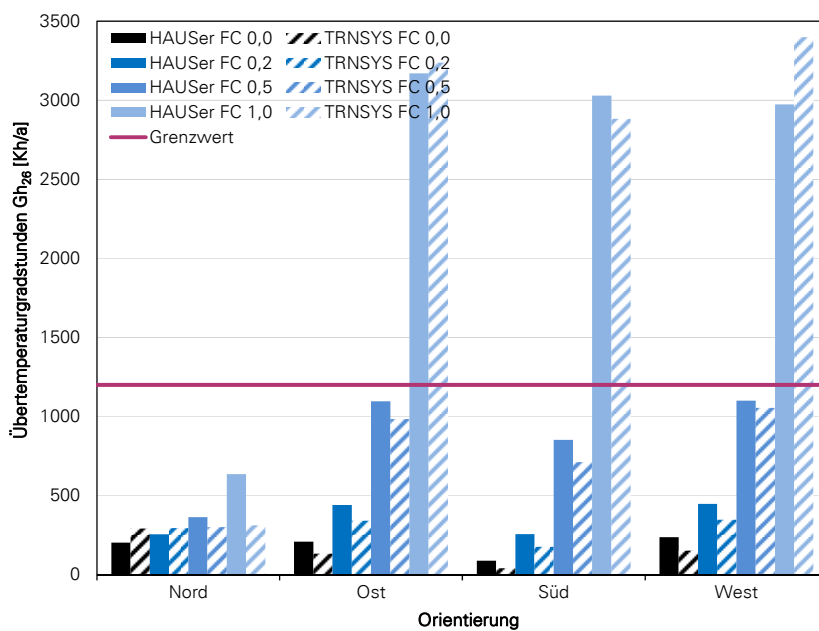


Bild 3-3
Gegenüberstellung der Übertemperaturgradstunden für verschiedene Abminderungsfaktoren des Sonnenschutzes F_C und Orientierungen mit den Programmen HAUSer und TRNSYS bei fehlender Nachtlüftung.

Die Übertemperaturgradstunden der beiden Programme liegen in einer ähnlichen Größenordnung, zeigen jedoch Abweichungen auf. Ein auffälliger Unterschied ist, dass bei TRNSYS die Westorientierung durchweg die höchste Erwärmung des Raumes vorweist (mit Ausnahme der Nordorientierung bei $F_c = 0$). Dies entspricht der Erwartung, da sich der Raum durch die ansteigende Raumtemperatur über den Tag und die anschließend einfallende solare Einstrahlung stärker aufheizt (vgl. [Lam und Hiller 2014, 400]). Bei HAUSer ist dies je nach Abminderungsfaktor unterschiedlich: bei einem vorhandenen Sonnenschutz ($F_c = 0/0,2/0,5$) sind die Übertemperaturgradstunden bei der Westorientierung leicht erhöht, bei einem fehlenden Sonnenschutz ($F_c = 1$) sind sie bei Ost- und Südorientierung höher. Die Nordorientierung zeigt eine Auffälligkeit hinsichtlich des Einflusses des Sonnenschutzes: Hier führt eine Grenzbestrahlungsstärke von 200 W/m^2 bei TRNSYS zu einer nahezu durchgängig fehlenden Aktivierung des Sonnenschutzes, weshalb kein Einfluss des Abminderungsfaktors sichtbar ist. Bei HAUSer hingegen hat der Sonnenschutz einen sichtbaren Einfluss.

Die Unterschiede begründen sich auf verschiedene Ursachen. TRNSYS verwendet ein anderes Modell als HAUSer zur Umrechnung der solaren Strahlung auf die vertikalen Ebenen. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der Hauptfaktor für die oben beschriebenen Abweichungen, da das Strahlungsmodell die Orientierung mit der höchsten solaren Einstrahlung bestimmt und damit auch die Aktivierungszeiten des Sonnenschutzes. In TRNSYS kann zwischen fünf verschiedenen Strahlungsmodellen gewählt werden. In [Hauser 1977, 33] werden hiervon abweichende Berechnungsansätze genannt. Somit führt keines der in TRNSYS eingebundenen Strahlungsmodelle zu einer annähernden Beseitigung der Abweichungen, sondern eher zu einer Verschiebung derselben. Bei den hier dargestellten Berechnungen wird das aktuellste dieser Strahlungsmodelle – „Perez 1999“ – angewendet. Dieses führt gegenüber den anderen anisotropen Strahlungsmodellen zu den geringsten Abweichungen und wird durch den Softwareanbieter empfohlen. Es entspricht einer optimierten Version des Modells nach [Perez et al. 1988]. Von isotropen Strahlungsmodellen wird im TRNSYS-Handbuch abgeraten, da diese die Strahlung auf eine geneigte Fläche zu niedrig prognostizieren [Transsolar 2014b, 95].

Einige Parameter sind in TRNSYS zudem nicht zu verändern. Beispielsweise ist es in TRNSYS nicht möglich, konstante Wärmeübergangskoeffizienten einzustellen, lediglich eine Festlegung der konvektiven Anteile ist möglich. Auch Fenstern können keine konstanten Kennwerte zugewiesen werden. TRNSYS verwendet, wie in Kapitel 3.1 erwähnt, ein komplexes Modell für die Abbildung von

transparenten Bauteilen, U- und g-Werte werden für jeden Zeitschritt berechnet. Dabei ergibt sich für TRNSYS ein g-Wert im Mittel von 0,55 gegenüber HAUSer mit $g = 0,60$. Dies kann ein (weiterer) Grund für die tendenziell niedrigeren Übertemperaturgradstunden bei TRNSYS sein.

Auch bei einer Sensibilitätsanalyse mit Veränderung verschiedener Parameter – wie z. B. der Grenzbestrahlungsstärke bzw. der Hysterese der Sonnenschutzsteuerung, der konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten oder der Verwendung anderer Fenster – ist es nicht möglich, die Abweichungen weiter zu reduzieren, da das Strahlungsmodell den vermutlich höchsten Einfluss auf die Temperaturen besitzt.

Bei den Ergebnissen verschiedener Softwareprogramme liegen häufig Abweichungen vor. Eine tiefgehende Analyse der Abweichungen thermisch-dynamischer Simulationsprogramme und der Strahlungsmodelle wäre sinnvoll, ist jedoch nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit und wird somit an dieser Stelle nicht näher dokumentiert. Dennoch ist eine Vergleichsrechnung, wie sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgenommen wurde, hilfreich, da zahlreiche Einstellungen hinterfragt und überprüft werden und so die empfindlichen und weniger einflussreichen Parameter aufgedeckt werden.

Die im Rahmen der Berechnungen verwendeten TRNSYS-Komponenten wurden bereits einer Validierung, z. B. durch vergleichende Messungen, unterzogen. Die für die Untersuchungen bedeutsamen Komponenten zur Simulation der Bauteilaktivierung und der erdverlegten Rohre basieren auf der finiten Differenzenmethode, welche unter korrekter Wahl von Eingabeparametern und bei angemessenem Detaillierungsgrad des Rechengitters in der Lage ist die Realität zuverlässig abzubilden, wie bereits mehrfach belegt wurde (siehe z. B. [Glück 1999], [Hirsch et al. 2016]). Alle übrigen verwendeten Komponenten gehören dem TRNSYS-Standardpaket an. Von einer weiteren Validierung des Simulationsmodells wird somit abgesehen.

3.3.2 Korrekte Verwendung der Testreferenzjahre in TRNSYS

Das korrekte Einlesen und Umrechnen von Klimadaten in der Simulation ist elementar, um zu vermeiden, dass verfälschte und somit unverwertbare Ergebnisse produziert werden. Bei Simulationen gemäß der Randbedingungen nach [DIN 4108-2:2013-02] sind die Testreferenzjahre Deutschlands hinzuzuziehen. Diese beinhalten stündliche Werte für Außenlufttemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchtigkeit, direkte und diffuse Solarstrahlung auf die horizontale Ebene u. a.

Da die Solarstrahlung ausschließlich für die horizontale Ebene vorliegt, muss eine Umrechnung auf die vertikalen Ebenen vorgenommen werden.

Die zu verwendenden Testreferenzjahre (TRY; test reference year) aus dem Jahr 2011 verfügen über eine Fehlerquelle aufgrund unterschiedlicher Zeitbezüge der Strahlungsdaten. Ohne Korrektur der Zeitstempel kommt es zu einer stark abweichenden Strahlung auf die nach Osten und die nach Westen orientierte Ebene. Dies ist ungewöhnlich, da Osten und Westen im Regelfall ähnlich hohe Summenwerte aufweisen. Wie in [Lam und Hiller 2014] bereits untersucht und mittlerweile auch in das Handbuch des Deutschen Wetterdienstes [DWD 2014] aufgenommen, handelt es sich bei den Testreferenzjahren aus dem Jahr 2011 entweder um gemessene Strahlungsdaten (TRY 2, 3, 4, 9, 11, 12), welche als Mittelwert für die vergangene Stunde der Wahren Ortszeit (WOZ) vorliegen, oder um berechnete Strahlungsdaten (TRY 1, 5, 6, 7, 8, 10, 13, 14, 15), welche hingegen für die volle Stunde Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) bestehen. Für die berechneten Daten muss eine Verschiebung der Daten um 30 min ($7,5^\circ$) vorgenommen werden, da sich die Werte auf das Zeitintervall von $-0,5$ h bis $+0,5$ h beziehen. Die gemessenen Daten hingegen müssen um die Differenz zwischen Standardmeridian und lokalem Längengrad verschoben werden. Bei korrekter Beachtung dieser Zusammenhänge sind die Differenzen der Strahlung auf die Ost- und Westfläche für die unterschiedlichen TRY-Datensätze nur noch gering [Lam und Hiller 2014].

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Daten in TRNSYS einzulesen, welche mit unterschiedlichen Einschränkungen verbunden sind.

Eine Möglichkeit die TRY-Daten zu verwenden, ist zuerst eine Bereinigung der Datensätze vorzunehmen und diese anschließend mit mehreren Types weiterzuverarbeiten. Das „Bereinigen“ der Datensätze (z. B. mithilfe von Excel oder einem Texteditor) bedeutet, die Datenreihen dahingehend zu verändern, dass diese als .prn-Datei ohne den Header der ursprünglichen Dateien vorliegen. Die Daten werden anschließend mit einem einfachen Datenleser (Type 9) in TRNSYS eingelesen und an einen Strahlungsprozessor (Type 16) übergeben. Dieser verarbeitet die auf die horizontale Ebene bezogenen Strahlungsdaten und rechnet sie auf die vertikale Ebene der gewünschten Orientierungen um. Die oben genannte Korrektur der Daten erfolgt durch den Parameter „shift in solar time“. Üblicherweise wird hier die Differenz zwischen Standardmeridian und lokalem Längengrad eingetragen. Für die berechneten Daten wird der Parameter zusätzlich um $7,5^\circ$ korrigiert. Im Falle gemessener Daten wird der Wert 0 eingegeben. Die Kombination aus Type 9 und 16 ist wenig benutzerfreundlich, da zusätzlich dazu

zwei weitere Types erforderlich sind, welche die Berechnung der Taupunkttemperatur und der Himmelstemperatur vornehmen. Für das Einlesen einfacher unformatierter Datenreihen ist der Type 9 jedoch wichtig.

Alternativ hierzu kann der Type 99 eingesetzt werden, welcher gleichzeitig als Datenleser und als Strahlungsprozessor fungiert. Die Berechnung der Taupunkt- und Himmelstemperatur muss allerdings auch hier „extern“ erfolgen. Der Type erfordert als Dateninput einen formatierten TRY-Datensatz. Die Konvertierung der Daten kann mit einem von Transsolar zur Verfügung gestellten Tool [Transsolar o. J.] durchgeführt werden. Ein Nachteil des Types ist, dass die oben genannte erforderliche Verschiebung der Strahlungsdaten im Type selbst nicht möglich ist. Die Korrektur kann jedoch im Datensatz händisch durchgeführt werden, indem der Längengrad angepasst wird.

Der Type 15-7, ebenfalls eine Kombination aus Datenleser und Strahlungsprozessor, stellt die eleganteste Lösung dar. Dieser kann die TRY-Datensätze ohne eine zusätzliche Formatierung verwenden und ist in der Lage, sowohl die Strahlung auf vertikale Ebenen umzurechnen als auch sämtliche Temperaturen wie Außenlufttemperatur, Taupunkttemperatur, Himmelstemperatur und monatliche Mittelwerte auszugeben. Die Verschiebung der Strahlungsdaten kann hier über die Anpassung des Längengrads innerhalb des Types erfolgen.

Da alle drei Einlesevarianten zu identischen Ergebnissen führen, kommt der komfortable Type 15-7 für die vorliegenden Berechnungen zum Einsatz. Dabei wird das Strahlungsmodell „Perez 1999“ für die Umrechnung gewählt.

Die Eingabeparameter für die Verschiebung der Strahlungsdaten aller TRY-Datensätze mittels Type 16 und Type 15-7 sind im Anhang A dokumentiert.

3.4 Auswahl eines passiven Kühlsystems für die Parameterstudien

Eine Parameterstudie anhand thermisch-dynamischer Simulationen erfordert umfangreiche Bearbeitungs- und Rechenzeiten. Es ist eine Vielzahl an Modellaufbauten mit Variationen zahlreicher Parameter herzustellen. Aus diesem Grund wird für die vorliegende Arbeit nur eines der passiven Kühlsysteme, die vorangehend beschrieben wurden, für die Parameterstudien ausgewählt. Die Entscheidung fällt dabei für eine Bauteilaktivierung mit Kühlung über die Sohlplatte aus.

Ein Grund für diese Auswahl ist, dass das Kühlsystem mit geringen Mehrinvestitionen realisierbar ist. Zum einen kommt im Neubau, insbesondere im Wohnungsbau, häufig eine Fußbodenheizung zum Einsatz, da sie mit Vorteilen

hinsichtlich des thermischen Komforts und hinsichtlich des niedrigen Temperaturniveaus verbunden ist. Diese in der Sommerzeit zur Aufnahme von Wärme zu nutzen, bietet sich an. Die Sohlplattenkühlung geht zum anderen mit einem geringen Mehraufwand einher, da ohnehin ein Aushub für die Bodenplatte hergestellt werden muss. Dieser kann durch Verlegung von Rohrschlangen im Erdreich einen zweiten Nutzen erfahren. Ein weiteres Argument für die Wahl des Systems im Rahmen der Parameterstudien ist ein geringer Bestand an Forschungsarbeiten. Der Großteil der Literatur weist nur oberflächlich auf die Möglichkeit zur thermischen Nutzung der Sohlplatte hin, umfangreiche Untersuchungen des Kühlpotenzials fehlen. Auch die Möglichkeiten des Aufbaus als Simulationsmodell sind nicht hinreichend dokumentiert. Damit stellt die Sohlplattenkühlung hinsichtlich ihres Potenzials für einen erhöhten Einsatz im Neubau sowie hinsichtlich des Forschungsstands das für die vorliegende Arbeit sinnvollste System dar.

Als System der Bauteilaktivierung wird im Rahmen der Berechnungen primär eine Fußbodenheizung verwendet. Untersuchungen zur Kühlleistung einer Betonkernaktivierung gegenüber einer zur Kühlung genutzten Fußbodenheizung sind jedoch ebenso von Interesse, daher werden beide Systeme in die Parameterstudie einbezogen. Der Fokus liegt jedoch auf der Fußbodenheizung aufgrund ihrer jahreszeitübergreifenden Nutzung.

3.5 Modellaufbau

3.5.1 Auswahl und Aufbau eines Gebäudemodells

Zu Beginn der Simulationen ist ein Gebäudemodell zu bestimmen, welches für die Simulationen herangezogen wird. Die Alternativen sind der für die Plausibilitätsprüfung verwendete Prüfraum oder ein mehrzoniges Gebäudemodell. Der Prüfraum verfügt über den Vorteil, dass er auf viele Raumsituationen, vor allem in Bürogebäuden, übertragbar ist. Das einzonige Modell allein ist jedoch nicht in der Lage, einen typischen Anwendungsfall für die Sohlplattenkühlung abzubilden und wird der Komplexität des Systems und den verschiedenen Wechselwirkungen nicht gerecht. Daher fällt die Entscheidung gegen den Prüfraum und für ein mehrzoniges komplexeres Gebäudemodell aus.

In neu zu errichtenden Wohngebäuden bietet sich wie bereits erwähnt eine Fußbodenheizung in Kombination mit einer Sohlplattenkühlung an. Im Bürobau ist die Sohlplattenkühlung seltener von Vorteil, denn hier liegt häufig eine hohe Geschossanzahl vor, womit die Kühlleistung durch die flächentechnisch begrenzte Wärmesenke sinkt. Aus diesem Grund wurde ein kleines Mehrfamilienhaus (MFH) für die Parameterstudie verwendet, welches mit nur sechs Wohneinheiten und drei

Geschossen im Neubau einen sinnvollen Anwendungsfall darstellt. Um hierbei typische Bauteilflächen abzubilden, wurde auf die am Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) entwickelte Modellgebäude-Datenbank aus dem Jahre 2009 zurückgegriffen [Klauß und Kirchhof 2010]. Diese enthält Modellgebäude für verschiedene Gebäudetypen, welche auf Basis von umfangreichen statistischen Auswertungen zu realen neu errichteten Wohn- und Nichtwohngebäuden erstellt wurden. Bei dem kleinen MFH, welches einen dieser Gebäudetypen darstellt, handelt es sich um ein nach Norden und Süden an Bebauung angrenzendes Gebäude (vgl. Bild 3-4).



Bild 3-4 „Mehrfamilienhaus klein mit sechs Wohneinheiten“ aus der Modellgebäude-Datenbank – Ansicht Nord-West [Klauß und Kirchhof 2010, 53].

Da in den vorliegenden Untersuchungen ein freistehendes Objekt betrachtet werden soll, um Einflüsse durch angrenzende Bebauung zu umgehen und um solare Einflüsse von allen Orientierungen zu untersuchen, ist das MFH mit seiner ursprünglichen Kubatur für die vorliegenden Untersuchungen nur bedingt geeignet. Aus diesem Grund wurde auf Basis der gegebenen Bauteilflächen ein freistehendes kleines MFH entwickelt. Das Gebäude entspricht hinsichtlich der Abmessungen dem Modellgebäude, jedoch grenzen alle Außenwände an Außenluft. Zudem wurden die Fensterflächenanteile verändert, um auf allen vier Außenseiten übliche Fensterflächen vorzuweisen. Da durch eine Umverteilung der in der Modellgebäude-Datenbank angegebenen Fensterflächen für Neubauverhältnisse geringe, unplausible Flächenanteile entstehen würden, wurde auf eine Studie aus dem Jahre 2015 zurückgegriffen, die die Modellvorhaben im Netzwerk Effizienzhaus Plus auswertet [Erhorn und Bergmann 2015]. Für den Mehrfamilienhausbereich kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass „der Fensterflächenanteil (im Mittel) an der Nordfassade bei 29 %, für die Ausrichtung nach Osten bei 37 %, für Süd bei 39 % und für West bei 25 %“ liegt. Diese Werte übersteigen die Flächenanteile, welche durch einfache Umverteilung entstehen, deutlich. Unter Berücksichtigung der erhöhten Werte nach [Erhorn und Bergmann 2015] wurden daher vom ursprünglichen MFH abweichende Fensterflächenanteile festgelegt.

Das für die Parameterstudie modifizierte MFH weist folgende fassadenbezogene Fensterflächenanteile auf, welche vereinfachend wie folgt gerundet wurden: Norden 20 %, Osten 30 %, Süden 40 % und Westen 30 %. Die identischen Anteile in Osten und Westen sind durch einen gespiegelten Grundriss begründet.

Für die Modellgebäude wurden vom ZUB lediglich die Bauteilflächen bestimmt, welche die wärmeübertragende Hüllfläche bilden. Dies ist für energetische Bilanzierungen in der Regel ausreichend, da jedoch für den sommerlichen Wärmeschutz das thermische Verhalten einzelner Räume von Interesse ist, wurde für das kleine MFH ein Grundriss gestaltet, welcher einen Wohnraum mit integrierter Küchenzeile, ein Schlafzimmer, ein Bad und einen kleinen Flur vorsieht. Der Grundriss des Erdgeschosses ist in Bild 3-5 zu sehen. Die Grundrisse von Obergeschoss und Dachgeschoss sind identisch (mit Ausnahme der Eingangstür zum Treppenhaus, welche durch zwei bodentiefe Fenster ersetzt ist, siehe Bild 3-6). Im Gegensatz zu den ZUB-Modellgebäuden ist die mit Balkonen versehene Fassade nach Süden ausgerichtet und das Treppenhaus nach Norden. Dies ist für ein freistehendes Gebäude sinnvoller und führt zu einem thermisch ähnlichen Verhalten der gespiegelten Wohnungen je Geschoss.

In Tabelle 3-1 sind die Brutto-Außenwandflächen und die neu bestimmten fassadenbezogenen Fensterflächenanteile des kleinen freistehenden MFH sowie die sich dadurch ergebenden Fensterflächen je Orientierung dokumentiert. Tabelle 3-2 zeigt die Grundflächen und Fensterflächen der einzelnen Räume und des gesamten Gebäudes sowie den daraus resultierenden grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil. Der Fensterflächenanteil einer Wohneinheit weicht von dem des gesamten Gebäudes ab, da das Treppenhaus nicht in die Flächenermittlung einfließt. Die gesamte Flächenermittlung sowie die vollständigen Grundrisse und Schnitte des Gebäudes sind in Anhang B aufgeführt.

Tabelle 3-1 Außenwandflächen und fassadenbezogener Fensterflächenanteil des MFH sowie die resultierenden Fensterflächen.

Orientierung	Außenwandfläche A_{Aw} [m ²]	fassadenbez. Fensterflächenanteil $f_{w,f}$ [%]	Fensterfläche A_w [m ²]	
			insg.	abzgl. Treppenhaus
Norden	119,63	20	23,93	17,21
Osten	107,25	30	32,18	
Süden	119,63	40	47,85	
Westen	107,25	30	32,18	
			$\Sigma = 136,13$	$\Sigma = 129,41$

3 Simulationsumgebung und Modellaufbau

Tabelle 3-2 Grund- und Fensterflächen der einzelnen Räume und des gesamten Gebäudes sowie der resultierende grundflächenbezogene Fensterflächenanteil.

Raum/Bereich	Grundfläche A_G [m ²]	Fensterfläche A_w [m ²]	Orientierung	grundflächenbez. Fensterflächenanteil $f_{w,g}$ [%]
Wohnen	32,50	5,68	Osten/Westen	42
		7,98	Süden	
Schlafen	21,06	2,86	Norden	29
		3,22	Osten/Westen	
Bad	8,24	1,82	Osten/Westen	22
Flur	4,62	-	-	-
je Wohneinheit	66,42	21,57	alle	32
gesamtes Gebäude	455,64	136,13	alle	30

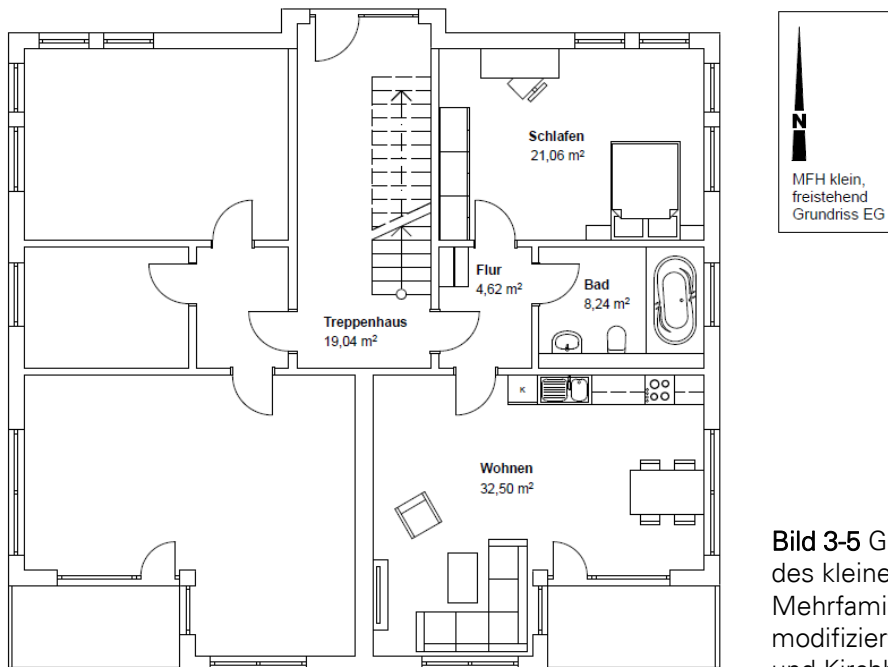


Bild 3-5 Grundriss Erdgeschoss des kleinen freistehenden Mehrfamilienhauses, erstellt und modifiziert auf Basis von [Klauß und Kirchhof 2010].

Perspektivische Ansichten des Gebäudes von Nordwesten und Südosten zeigen die beiden nachfolgenden Abbildungen Bild 3-6 und Bild 3-7.



Bild 3-6 Nordwestansicht des kleinen Mehrfamilienhauses, erstellt und modifiziert auf Basis von [Klauß und Kirchhof 2010].



Bild 3-7 Südostansicht des kleinen Mehrfamilienhauses, erstellt und modifiziert auf Basis von [Klauß und Kirchhof 2010].

3.5.2 Simulationsmodell der Bauteilaktivierung

Die Einbindung der Bauteilaktivierung in TRNSYS erfolgt über den Type 360. Jede Wohnung wird mit je zwei Types verknüpft. Ein Type wird dem Wohn-/Esszimmer mit Küchenzeile zugeordnet (im Folgenden der Einfachheit halber Wohnzimmer genannt), da es gegenüber den übrigen Räumen einer erhöhten solaren Einstrahlung ausgesetzt ist und daher getrennt angesteuert werden sollte. Die Bauteilaktivierung der anderen Räume – Schlafzimmer, Bad und Flur – wird zu einem gemeinsamen Type zusammengefasst. Grund für diese Vereinfachung ist,

dass die Rechenzeit und die Komplexität des Modells bei einer raumweisen Kühlung deutlich steigen würden. Zudem weisen die drei Räume aufgrund der Fassadenorientierungen und Fensterflächenanteile gegenüber dem Wohnzimmer ähnliche Raumtemperaturen auf. Bei Anwendung dieser Vereinfachung beinhaltet das Modell insgesamt sechs Types 360. In Bild 3-8 ist die Zuweisung der Types schematisch dargestellt. BTA1 (rot) bezeichnet die Bauteilaktivierung der zusammengefassten Räume, BTA2 (grün) bezeichnet die Bauteilaktivierung des Wohnzimmers. Auch die Sohlplattenkühlung (SPK) kann durch den Type 360 abgebildet werden (siehe Kapitel 3.5.3), hierbei wird die gesamte Geschossfläche ausgenutzt (blau). Bei der Kühlung des westlichen Gebäudeteils ist die Abbildung entsprechend gespiegelt.

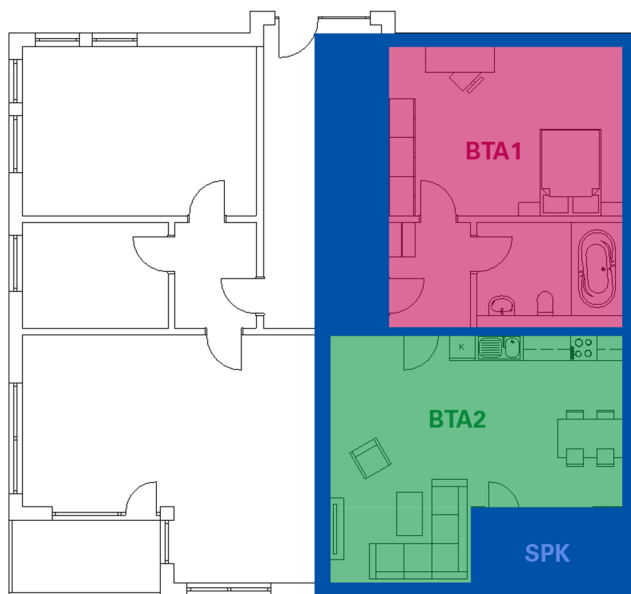


Bild 3-8 Zuordnung der Bauteilaktivierung (BTA)/Sohlplattenkühlung (SPK) für eine Wohnung.

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, wird jedes aktivierte Bauteil für die Simulation in einzelne Abschnitte eingeteilt. Jeder Abschnitt verfügt über ein Wasser durchströmtes Rohr und üblicherweise eine Breite von 15 cm, entsprechend dem Abstand der Rohre zueinander. Dem Abschnitt wird ein Gitter mit 50 Knoten („Nodes“) zugeordnet, für welche die jeweiligen Materialeigenschaften, Abmessungen und die Position im Gitter festgelegt werden. Ein Beispiel für die Einteilung einer Decke und die erforderliche Durchnummerierung der Knoten zeigt Bild 3-9.

Die Beschreibung der geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften solch eines Abschnitts erfolgt in einem externen Textfile (.fbh-File), das dem Type 360 zur Verfügung gestellt wird. Durch Anfertigung verschiedener .fbh-Files werden die Rohr- und Konstruktionseigenschaften beliebig variiert. Dabei können die Material-

eigenschaften des Rohrs vernachlässigt werden, die Rohrwanddicke hingegen wird im .fbh-File definiert. Der Type geht zunächst von einem rechteckigen Rohrquerschnitt aus, die Berechnung des runden Querschnitts erfolgt über einen Korrekturfaktor.

Die Rohreigenschaften (Durchmesser und Abstände) finden sich in der Übersicht der variierten Parameter in Kapitel 3.6.4. Die Deckenkonstruktionen können dem Anhang C entnommen werden.

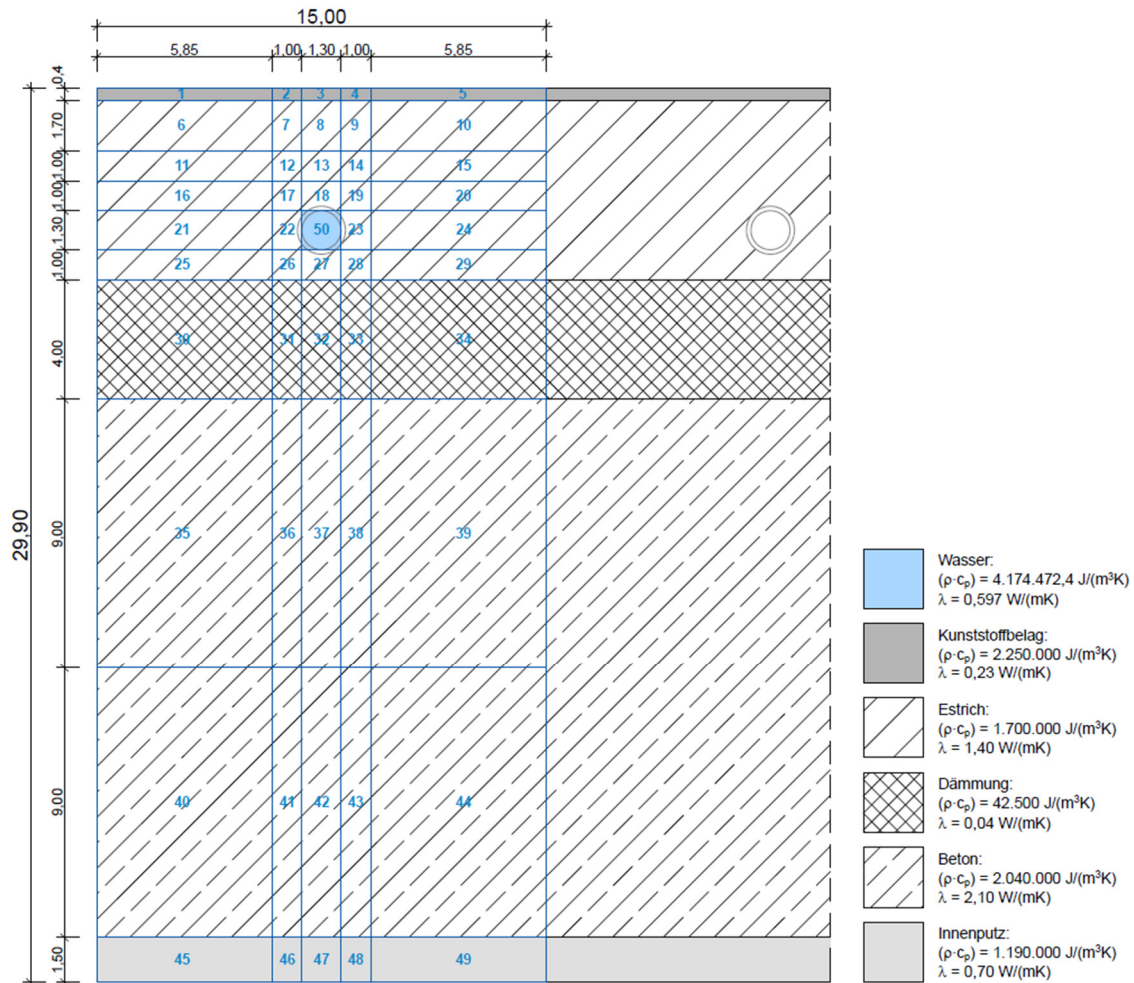


Bild 3-9 Beispiel für die Einteilung einer Decke in verschiedene „Knoten“ mit Angabe der Materialeigenschaften (Produkte aus Rohdichte und spez. Wärmekapazität sowie Wärmeleitfähigkeiten).

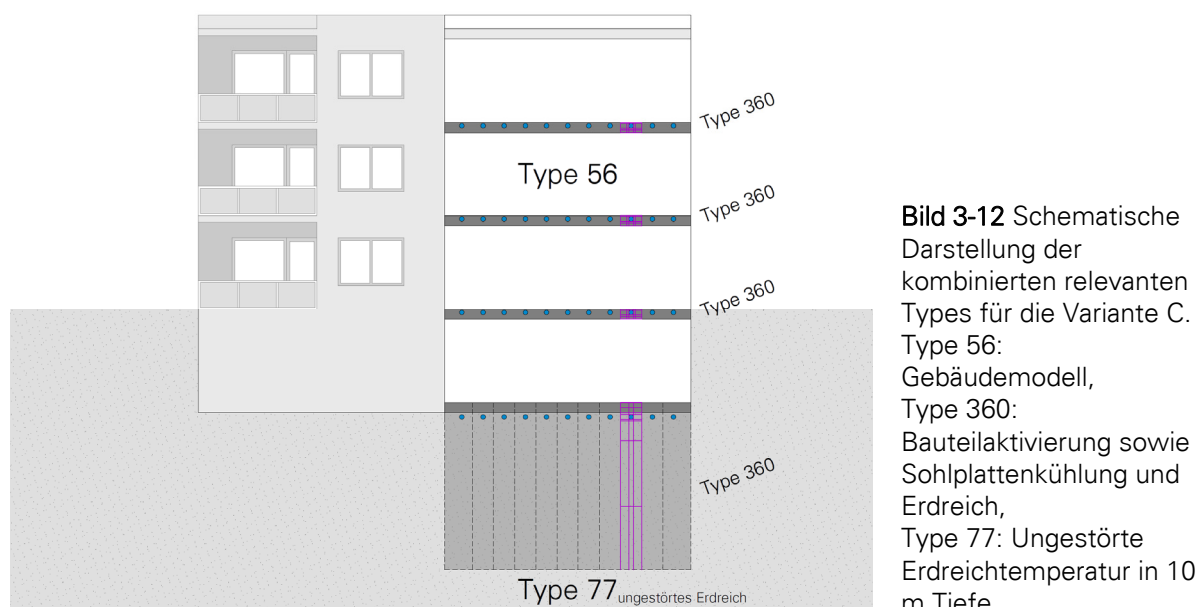
3.5.3 Simulationsmodell der Sohlplattenkühlung und des Erdreichs

Da innerhalb der TRNSYS- und TESS-Kataloge keine Komponente für die vollständige Abbildung einer Sohlplattenkühlung enthalten ist, wird die Modellierung über Umwege vorgenommen. Mithilfe des Types 360 können zwar die Bauteile detailliert modelliert werden, nicht jedoch das Erdreich und dessen Temperatur. Um ein Modell zu erarbeiten, das die Wärmeübertragungsvorgänge im

Da die Berechnungsvorgänge der thermisch aktivierten Bodenplatte auf gleiche Weise wie die der Bauteilaktivierung in den oberen Geschossen erfolgen können, kann für die Berechnung der Bodenplatte ebenfalls der beschriebene Type 360 verwendet werden, welcher an den Erdreich-Type 1244 gekoppelt wird. Die Fluidtemperaturen der in den oberen Geschossen verorteten Types 360 werden mit dem an das Erdreich grenzenden Type 360, welcher die Kühlung über die Sohlplatte abbildet, verknüpft. Insgesamt verfügt das Modell schließlich über sieben Types 360 (zwei je Geschossdecke und einer für die Sohlplatte). Die für diese Variante verwendeten Types sind schematisch in Bild 3-11 dargestellt.

3.5.3.3 Variante C

Variante C beinhaltet eine Einbindung der Erdreichtemperatur mithilfe des Types 77 in 10 Metern Tiefe, da hier eine weitgehend ungestörte Erdreichtemperatur angenommen werden kann, vgl. Abschnitt 3.5.3.1. Ein Einfluss durch das Gebäude auf die Erdreichtemperatur des Types 77 kann nicht berücksichtigt werden, da der Temperaturverlauf des Types 77 nur anhand fester Parameter berechnet wird. Dennoch wird versucht eine realistische Abbildung der Sohlplattenkühlung vorzunehmen, indem der Type 360 die Bodenplatte zzgl. eines Erdreichteilstücks modelliert, wie in Bild 3-12 dargestellt. Das .fbh-File des Types 360 enthält dafür eine weitere Schicht mit den festzulegenden Eigenschaften des Erdreichs.



Die Berechnung der Temperaturamplitude für Type 77 wird hier anhand des maximalen Monatsmittels und anhand des Jahresmittelwerts der Außentemperatur vorgenommen. Aus dem TRNSYS-Handbuch wird nicht ersichtlich, ob monatliche oder stündliche Werte für die Berechnung der Amplitude verwendet

werden sollen. Ein stündlicher Bezug der maximalen Außenlufttemperatur würde jedoch zu einer unrealistisch hohen Temperaturamplitude im Erdreich führen. Dadurch wären in 3 m Tiefe noch Temperaturen unterhalb von 0 °C zu verzeichnen. Dies widerspricht Angaben aus der Literatur zu diesem Thema, wie z. B. [Blümel et al. 2001, 10] und [Dibowski et al. 2004c, 6]. Gemäß [Stober und Bucher 2012, 32] kann der Boden im Winter nur bis in etwa 1 m Tiefe gefroren sein. Nach [DIN EN ISO 13370:2008-04] werden zur Berechnung der Wärmeübertragung über das Erdreich die Schwankungen der Außenlufttemperatur gegenüber dem Jahresmittel ebenfalls anhand der jeweiligen Monatsmitteltemperaturen erfasst. Entsprechend erfolgt eine Verwendung der monatlichen Werte zur Amplitudenberechnung.

3.5.3.4 Variantenvergleich und -auswahl

Für alle Varianten wird der in Kapitel 3.6.4 definierte Basisfall für einen Zeitraum von mehreren Jahren simuliert, um die langfristige Temperaturänderung zu beobachten und zu vergleichen. Ausgewertet wird die Zone „Wohnen OG“. Es zeigen sich starke Abweichungen hinsichtlich der Temperaturverläufe und der Übertemperaturgradstunden. Erwartet wird, dass die Erdreichtemperatur insbesondere in den ersten Jahren der Wärmeaufnahme durch die Sohlplattenkühlung ansteigt, bis nach einigen Jahren ein Temperatúrausgleich stattfindet und der Anstieg abflaut.

Eine Eigenschaft aller Varianten ist, dass keine dauerhafte Erwärmung der Erdreich- und Bodenplattentemperatur vorliegt. In den ersten Jahressimulationen ist eine Erwärmung zu beobachten, doch spätestens nach fünf Jahren entsteht ein nahezu gleichbleibender Temperaturverlauf. Bei den Varianten B und C ist bereits im dritten Jahr nur noch eine minimale Temperaturerhöhung erkennbar. Die Übertemperaturgradstunden steigen gegenüber dem zweiten Jahr um nur 1 % und danach gar nicht mehr an. Variante A weist eine länger anhaltende Steigerung auf, was der oben beschriebenen Erwartung entspricht. Im dritten Jahr liegt die Steigerung für die Zone „Wohnen OG“ noch bei etwa 20 %, im vierten Jahr bei ca. 6 % und sinkt dann langsam bis auf 0 % im zehnten Jahr ab (im Erd- und Dachgeschoss ähnliche Größenordnung). Tabelle 3-3 zeigt die Entwicklung der Übertemperaturgradstunden in einem Zeitraum von zehn Jahren, Bild 3-13 den Verlauf der Erdreichtemperatur in einem Zeitraum von fünf Jahren, jeweils für Variante A.

3 Simulationsumgebung und Modellaufbau

Tabelle 3-3 Veränderung der Übertemperaturgradstunden über einen Zeitraum von 10 Jahren für Variante A, Zone „Wohnen OG“ bei einem Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes F_c von 0,7.

Jahr									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Übertemperaturgradstunden G_{h26} [Kh/a]									
266,9	489,1	586,3	619,7	631,5	634,9	636,6	637,2	637,7	637,7
Prozentuale Steigerung G_{h26} gegenüber dem Vorjahr									
-	83,2 %	19,9 %	5,7 %	1,9 %	0,5 %	0,3 %	0,1 %	0,1 %	0,0 %

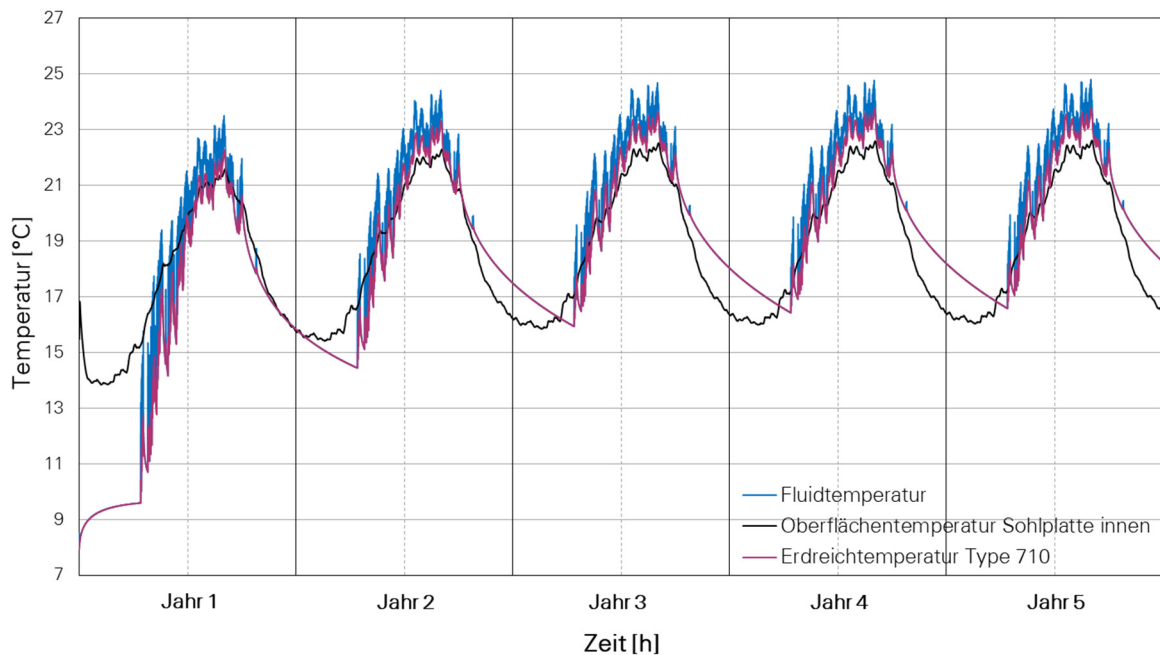


Bild 3-13 Verlauf der Erdreichtemperatur, Sohlplattentemperatur an der Innenseite und der Fluidtemperatur gemäß Simulation über einen Zeitraum von fünf Jahren für Variante A, Zone „Wohnen OG“ bei einem Abminderungsfaktor von 0,7.

Die Temperaturverläufe im Erdreich bei Variante A entsprechen am ehesten Temperaturen in der Literatur (z. B. [Hauser et al. 2004, 116], gemessene Temperaturen in und unterhalb der Sohlplatte). Bei den Varianten B und C kommt es zu Stabilitätsproblemen der Simulationen, welche sich durch starke Temperatursprünge an der Bodenplattenunterseite bemerkbar machen. Die Verwendung des Types 360 für die Bodenplatte scheint hier ursächlich zu sein. Bereits eine Veränderung der Komponentenreihenfolge in TRNSYS (diese bestimmt die Reihenfolge im .dck-File) verursacht starke Veränderungen der Temperaturverläufe der Bodenplatte, löst jedoch nicht das Problem. Eine Vermutung ist, dass der Type 360 nicht für Außenbauteile, die gegenüber innenliegenden Bauteilen eine stark abweichende Umgebungstemperatur aufweisen, geeignet ist. Die Varianten B und C erweisen sich damit als untauglich. Variante B erzeugt zudem auffällig geringe

Übertemperaturgradstunden, der Grenzwert nach [DIN 4108-2:2013-02] wird nur bei fehlender Tag- und Nachtlüftung überschritten. Die Beeinflussung der Erdreichtemperatur durch das Gebäude ist nur geringfügig sichtbar. Hinzu kommt eine sehr hohe Rechenzeit des Types 1244, womit mehrere Gründe gegen die Verwendung der Variante B sprechen.

Auf Grund der beschriebenen Problematik bei Variante B und C wird für die folgenden Parameterstudien die Variante A eingesetzt.

Für die Sohlplatte werden verschiedene Geometrien erstellt. Dabei wird sowohl die Position der Dämmebene variiert – unterhalb oder oberhalb der Bodenplatte – als auch die Dicke der Dämmung. Da die Rohre der Sohlplattenkühlung beim Type 710 im Erdreich unterhalb der Bodenplatte platziert sind, ist eine Dämmung der Bodenplatte von unten ebenfalls denkbar. Zudem werden verschiedene Rohrdurchmesser und -abstände simuliert. Die Konstruktionen der Bauteile werden in Kapitel 3.6.2.1 beschrieben. Die genauen Bauteilaufbauten sind dem Anhang C zu entnehmen. Die Rohreigenschaften sind in der Gesamtübersicht in Kapitel 3.6.4 zu sehen. Aufgrund der Verwendung der Variante A, erfolgt die Erstellung der Varianten der Bodenplattenkonstruktion im Gebäudemodell, simuliert mit Type 56.

Ein weiterer Type, der für eine Abbildung der Sohlplattenkühlung in Frage kommt, ist der TESS-Type 1267 „'Be All End All' Ground Coupling“. Dieses Modell bildet eine Bodenplatte oder einen Kriechkeller ab und stellt dabei eine „thermische Kommunikation“ mit dem Erdreich her. Gleichzeitig können Rohre, in denen Wasser zirkuliert, in der Bodenplatte oder in deren Umgebung platziert werden. Der Type stellt eine individuell zu erwerbende Komponente dar und ist somit gegenüber den meisten anderen erdreichgekoppelten Komponenten der Firma TESS nicht innerhalb der „Ground Coupling Library“ enthalten. Da der Type 1267 zum Zeitpunkt der Berechnungen nicht vorlag, konnten Untersuchungen mithilfe dieses Types nicht mehr vorgenommen werden. Eine Anwendung wäre für weiterführende Ausarbeitungen durchaus von Interesse.

3.5.4 Anlagenschema

Für die Auslegung der Rohre und die Bestimmung der Druckverluste, sind Überlegungen zur Rohrführung erforderlich. Damit in allen Kühlkreisen ähnlich hohe Druckverluste bestehen, ist eine Rohrführung nach Tichelmann, bei der jeder Kühlkreis in etwa gleiche Rohrwegelängen erhält, sinnvoll, wie beispielsweise in [Recknagel et al. 2015a, 1269f] ausgeführt. Bei Verwendung der Tichelmannschen Rohrführung ergibt sich eine Rohrführung wie in Bild 3-14 zu sehen.

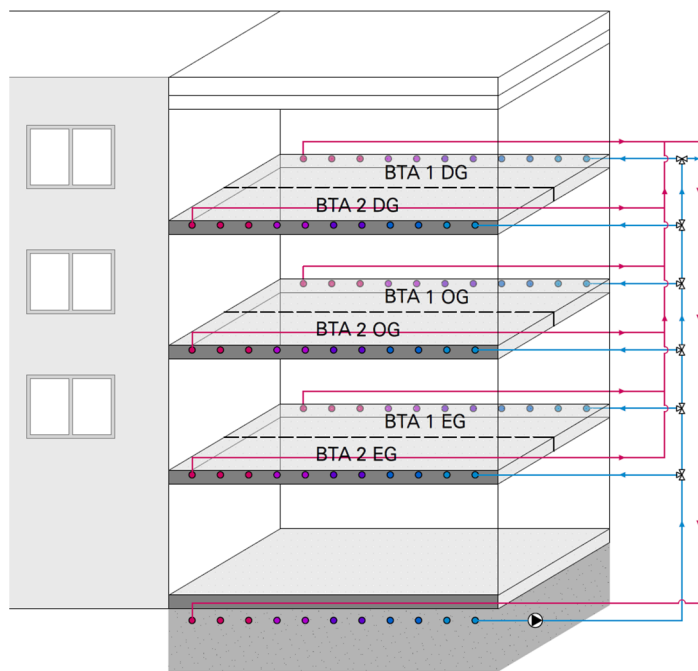


Bild 3-14 Schematische Darstellung der Rohrführung nach Tichelmann.

3.5.5 Pumpen- und Rohrauslegung

Um eine Berechnung des Hilfsenergiebedarfs der Sohlplattenkühlung vornehmen zu können, ist die Kenntnis der Leistungsaufnahme der Pumpe Voraussetzung.

Für den Transport des abgekühlten Wassers aus der Sohlplatte in die drei Geschosdecken ist nur eine Umwälzpumpe erforderlich. Für die Auslegung der Umwälzpumpe, die das abgekühlte Wasser aus der Sohlplatte in die drei Geschosdecken transportiert, ist die Ermittlung der Förderhöhe H erforderlich. Diese kann gemäß [Recknagel et al. 2015a, 1267ff] nach folgender Formel ermittelt werden:

$$H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \quad (3-1)$$

mit	H	[m]	Pumpen-Förderhöhe
	Δp	[Pa]	Gesamtdruckverlust (1 Pa = 1 kg/(m·s ²))
	ρ	[kg/m ³]	Rohdichte Wasser $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
	g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Der Gesamtdruckverlust setzt sich zusammen aus den Rohrreibungsverlusten und dem Druckverlust der Einzelwiderstände, wie z. B. Formstücke, Armaturen und Thermostatventile, und ergibt sich wie folgt:

$$\Delta p = \sum(R \cdot L) + \sum Z \quad (3-2)$$

mit	R	[Pa/m]	Rohrreibungsdruckgefälle im geraden Rohr
	L	[m]	Rohrlänge des ungünstigsten Heizstranges für Vor- und Rücklauf
	Z	[Pa]	Druckverlust durch Einzelwiderstände

Vereinfacht kann der Druckverlust der Einzelwiderstände Z mit 50 % der Rohrreibungsverluste angenommen werden, bei Berücksichtigung von Thermostatventilen mit 100 % [Recknagel et al. 2015a, 1269]. Gemäß [Wilo 2016, 41] werden 120 % der Rohrreibungsverluste für das Vorhandensein von Formstücken, Armaturen und Thermostatventilen veranschlagt. Für die Berechnung der Druckverluste wird letzterer Wert zugrunde gelegt, womit die Berechnung den ungünstigsten Fall darstellt.

Für die Ermittlung der Rohrreibungsverluste sind zahlreiche weitere Parameter festzulegen. Es wird ein Volumenstrom in der Sohlplatte von 1,5 m³/h bzw. 1.500 l/h angenommen, der sich auf die 6 Kühlkreise mit je 250 l/h = 0,0694 l/s aufteilt. Um die Druckverluste gering zu halten, wird jede Zone über drei Wasserkreise gekühlt. Dies verringert den Volumenstrom je Kreis auf 0,023 l/s. Die Wasserkirkulation in der Sohlplatte wird auf fünf Kreise verteilt, womit sich ein Volumenstrom von jeweils 300 l/h = 0,083 l/s ergibt.

Die Wassergeschwindigkeit nach [VDI 2073-1:2014-05] soll in Nutzernähe $v \leq 0,7$ m/s betragen, um Strömungsgeräusche zu vermeiden. Dies ist mit den vorliegenden Randbedingungen problemlos möglich. Bei einem Rohr-Innendurchmesser der Bauteilaktivierung von 13 mm liegt die Wassergeschwindigkeit bei nur 0,17 m/s:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\frac{0,25 \text{ m}^3}{3 \cdot 3600 \text{ s}}}{\pi \cdot 0,0065^2 \text{ m}^2} = 0,174 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

In den vertikalen Verteilleitungen mit einem Rohrinne Durchmesser von 28 mm (bei Verwendung von auf dem Markt verfügbaren Rohren mit den Abmessungen 40 x 6,0 mm) liegt die Strömungsgeschwindigkeit bei 0,68 m/s und damit ebenfalls unterhalb des geforderten Wertes:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{1,5 \frac{\text{m}^3}{3600 \text{ s}}}{\pi \cdot 0,014^2 \text{ m}^2} = 0,68 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Die maximalen Leitungslängen der Rohre ergeben sich aus den Grundflächen der gekühlten Räume bzw. der Sohlplatte, den Rohrabständen und der Anzahl der Kreise. Die maximale Leitungslänge der Verteilungen wurde näherungsweise nach [DIN V 18599-7:2016-10, 44] anhand folgender Gleichung, geltend für quaderförmige Gebäude, ermittelt:

$$L_{\max} = 2 \cdot \left(L + \frac{B}{2} + h_G \cdot n_G + 10 \right) \quad (3-3)$$

mit L [m] Gebäudelänge (13 m)
 B [m] Gebäudebreite (7,25 m)
 h_G [m] mittlere Geschosshöhe (2,75 m)
 n_G [-] Anzahl Geschosse (3)

Die Bestimmung der Druckverluste in Pa/m wurde anhand von Herstellerangaben der Firma Rehau vorgenommen. In Tabelle 3-4 ist die darauf basierende Berechnung der Förderhöhe für Bauteilaktivierung, Sohlplatte und Verteilungen aufgeführt. Die Volumenströme sind in l/s angegeben, da die Rohrreibungsdruckverluste üblicherweise mithilfe dieser Einheit abgelesen werden.

Tabelle 3-4 Berechnung der Förderhöhe für die Auslegung der Pumpenleistung mit R nach [REHAU 2016b, 115], [REHAU 2016a, 27] und REHAU 2011, 89], Werte gerundet.

	Volumenstrom \dot{V} [l/s]	Maximale Länge Rohre L [m]	Druckverlust R [Pa/m]	Produkt R · L [Pa]
Bauteilaktivierung ungünstigster Fließweg (3 Kreise je Zone) Rohreigenschaften: 16 x 1,5 mm (REHAU Rautherm Speed)	0,023	78	50	3.900
Sohlplatte 1 Wasserkreis (5 Kreise insg.) Rohreigenschaften: 25 mm (REHAU Rauego collect Erdwärmekollektoren)	0,083	63	63	3.970
Verteilungen ungünstigster Fließweg Rohreigenschaften: 40 x 6,0 mm (REHAU RAUTITAN stabil, Spreizung 10 K)	0,417	70	190	13.300
Rohrreibungsverluste			$\Sigma (R \cdot L)$	21.170
Druckverluste Einzelwiderstände			$Z = 1,2 \cdot \Sigma (R \cdot L)^*$	25.400
Gesamtdruckverluste			Δp	46.570
Förderhöhe $H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \approx 4,75 \text{ m}$				

*1,2 = Zuschlagsfaktor für Einzelwiderstände nach [Wilo 2016, 41].

Anhand des Volumenstroms und der Gesamtdruckverluste kann die hydraulische Leistung ermittelt werden.

$$P_{\text{hyd}} = \dot{V} \cdot \Delta p \quad (3-4)$$

$$P_{\text{hyd}} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{3600\text{s}} \cdot 46.570\text{Pa} \approx 19,4\text{W}$$

Hiervon abzugrenzen ist die elektrische Leistung. Diese ergibt sich aus den Wirkungsgraden von Pumpe und Motor. Der Gesamtwirkungsgrad einer Pumpe ist das Produkt dieser beiden Wirkungsgrade:

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{Pumpe}} \cdot \eta_{\text{Motor}} \quad (3-5)$$

Die elektrische Leistung ergibt sich anhand folgender Gleichung:

$$P_{\text{el}} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta_{\text{ges}}} \quad (3-6)$$

Wurden Förderhöhe und Volumenstrom ermittelt, so kann eine Pumpe aus Katalogdaten der Hersteller ausgewählt und die elektrische Leistung und der Wirkungsgrad im jeweiligen Betriebspunkt abgelesen werden. Als Medientemperatur während des Betriebs wird eine Temperatur von 20 °C gewählt, da die Fluidtemperatur des Wärmeträgermediums im Mittel bei etwa 20 °C liegt (vgl. Bild 3-13). Eine auf dem Markt erhältliche Pumpe hat im angenommenen Betriebspunkt ($\dot{V} = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 4,75 \text{ m}$, $\theta_{\text{Betrieb}} = 20 \text{ °C}$) einen Gesamtwirkungsgrad von ca. 47,1 % und eine elektrische Leistung von ca. 41 W [Grundfos]. Für die vorliegenden Berechnungen wird somit von einer elektrischen Leistung $P_{\text{el}} = 41 \text{ W}$ bei Volllast ausgegangen.

Die Leistungsaufnahme und der Wirkungsgrad der Pumpe variieren in Abhängigkeit des tatsächlichen Volumenstroms. Die Pumpenkennlinie gibt das Verhältnis von Leistungsaufnahme und Wirkungsgrad zum Volumenstrom wieder. Die Werte können anhand der Pumpenkennlinien abgelesen werden. Das Belastungsprofil der Beispieldpumpe ist Bild 3-15 sowie Tabelle 3-5 zu entnehmen.

Neben dem Verhältnis von Volumenstrom zu Wirkungsgrad und Leistung zeigt Tabelle 3-5 zeigt zusätzlich die Förderhöhe für die vier vorhandenen Betriebsstufen der Pumpe.

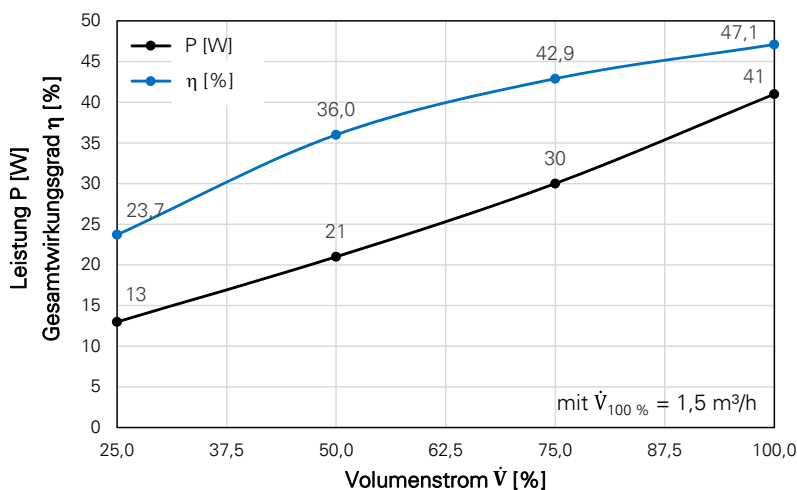


Bild 3-15
Leistungsaufnahme und Gesamtwirkungsgrad einer Hocheffizienz-Umwälzpumpe (Grundfos ALPHA2) in Abhängigkeit des Volumenstroms in % nach [Grundfos] im vorgegebenen Betriebspunkt.

Tabelle 3-5 Belastungsprofil einer Hocheffizienz-Umwälzpumpe (Grundfos ALPHA2) nach [Grundfos] im vorgegebenen Betriebspunkt.

	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
Volumenstrom [%]	100	75	50	25
Volumenstrom [l/h]	1500	1125	750	375
Förderhöhe H [%]	100	88	77	65
Gesamtwirkungsgrad η [%]	47,1	42,9	36,0	23,7
Leistung P_{el} [W]	41	30	21	13

3.5.6 Regelstrategien

3.5.6.1 Massenstrom

Um den Hilfsenergiebedarf durch die Förderpumpe gering zu halten, werden zwei verschiedene Regelstrategien für die Förderung des Wassers aus der Sohlplatte zu den Räumen betrachtet:

1. Konstanter Massenstrom in der Sohlplatte (und den Verteilleitungen) von 1500 kg/h, sobald die Raumlufttemperatur in einem Raum des Gebäudes eine Temperatur von 23 °C überschreitet.
2. Variabler Massenstrom in der Sohlplatte (und den Verteilleitungen) gemäß den oben genannten Stufen der Pumpe (von 0, 375, 750, 1125 bis zu 1500 kg/h), in Abhängigkeit der Anzahl der Räume mit einer Überschreitung der Raumlufttemperatur von 23 °C. Es wird dabei immer der mindestens erforderliche Massenstrom in den Zonen gefördert.

Die Lufttemperaturen in den Zonen werden mithilfe des TRNSYS-Types 2 überprüft, welcher eine Steuereinheit mit Hysteresefunktion abbildet. Dabei wird eine Hysterese von 1 Kelvin verwendet, um ein ständiges An- und Ausschalten der Pumpe zu vermeiden. Der Massenstrom in den einzelnen Kühlkreisen der Bauteil-

aktivierung beträgt jeweils 250 kg/h. Das heißt, sobald die Raumlufttemperatur eines Raums (Wohnzimmer) bzw. einer Raumgruppe (Schlafzimmer, Bad, Flur) den Grenzwert überschreitet, werden die Rohre mit Wasser durchströmt.

Für die bestehenden Flächen entspricht ein Massenstrom von 1500 kg/h in der Sohlplatte und 250 kg/h in der Bauteilaktivierung folgenden flächenspezifischen Massenströmen:

- Sohlplatte: 15,9 kg/(m²·h)
- Bauteilaktivierung 1 (Schlafzimmer, Bad, Flur): 7,1 kg/(m²·h)
- Bauteilaktivierung 2 (Wohnzimmer): 7,7 kg/(m²·h)

Zusätzlich erfolgt eine Kühlung nur oberhalb eines Tagesmittelwerts der Außenlufttemperatur von 12 °C, um zu vermeiden, dass ein Heizen und Kühlen am selben Tag stattfindet. Ohne diese Funktion kann es zu einer Kühlung an sonnigen Tagen zu Beginn eines Jahres (bereits im Februar) kommen, an denen die solare Einstrahlung Raumtemperaturen über 23 °C verursacht. Aufgrund der niedrigen Außenlufttemperaturen wäre hier jedoch eine Abfuhr der unerwünschten Wärme durch Lüftung energiesparender. Diese Einschränkung der Kühlung bewirkt eine Beschränkung der Kühlperiode auf maximal April bis Oktober und verringert zudem das frühzeitige Erschöpfen der Wärmesenke.

3.5.6.2 Luftwechsel

Für die Regelung des Luftwechsels im Falle erhöhter oder hoher Tag- und Nachtlüftung werden – wie bei der Bauteilaktivierung auch – Schlafzimmer, Bad und Flur je Geschoss in der Simulation zusammengefasst. Der Luftwechsel wird hier in Abhängigkeit von der mittleren Raumlufttemperatur der drei Räume bestimmt. Nur der Luftwechsel des Wohnzimmers wird einzeln geregelt. Für die Regelung der Lüftung wird ebenfalls der Type 2 eingesetzt. Er überprüft, ob die Bedingungen für einen erhöhten oder hohen Luftwechsel vorliegen. Für die gesamte Luftwechselregelung des Gebäudes ist der Type 2 in 18-facher Anzahl erforderlich, da für jede der sechs Zonen drei Temperaturzustände ($\theta_{i,Luft} > 20\text{ °C}$, $\theta_{i,Luft} > 23\text{ °C}$ und $\theta_{i,Luft} > \theta_e$) überprüft werden müssen, wie im nachfolgenden Kapitel 3.6.1 dokumentiert ist. Dabei wird auch hier eine Hysterese angesetzt, um eine zu hohe Taktung zu vermeiden.

3.5.6.3 Sonnenschutz

Es wird eine strahlungsabhängige Steuerung gemäß [DIN 4108-2:2013-02] angesetzt. Für nordorientierte Fenster wird eine Grenzbestrahlungsstärke von 200 W/m² und für alle anderen Orientierungen eine Grenzbestrahlungsstärke von

300 W/m² (Summe aus Direkt- und Diffusstrahlung, außen vor dem Fenster) pro Quadratmeter Fensterfläche angenommen. Wie auch beim Luftwechsel wird für die Steuerung des Sonnenschutzes der Type 2 verwendet. Die Hysterese beträgt 10 W/m², um eine übermäßige Aktivität des Sonnenschutzes zu vermeiden.

3.6 Simulationsrandbedingungen und Variationsparameter

Da für die Nachweisführung des sommerlichen Wärmeschutzes nach [DIN 4108-2:2013-02] die vorgegebenen Berechnungsrandbedingungen zu verwenden sind, wird die Parameterstudie mit wenigen Ausnahmen nach den in der Norm dokumentierten Randbedingungen durchgeführt. Diese sind im Folgenden beschrieben. Abweichungen werden als solche kenntlich gemacht.

Zudem müssen einige weitere Randbedingungen für die Parameterstudie definiert werden, welche in den nachfolgenden Kapiteln dokumentiert sind.

3.6.1 Berechnungsrandbedingungen gemäß DIN 4108-2:2013-02

Im Folgenden sind die angesetzten Berechnungsrandbedingungen nach [DIN 4108-2:2013-02] aufgeführt. Da in der Parameterstudie ein Mehrfamilienhaus betrachtet wird, werden nur die Randbedingungen für Wohngebäude dokumentiert. Von der Norm abweichende Randbedingungen sind erläutert.

a) *Simulationsumgebung:*

Bei dem verwendeten Programm handelt es sich um TRNSYS, Version 17.02.0004.

b) *Nutzungen/Nutzungszeiten:*

Bei dem untersuchten Gebäude handelt es sich um ein Wohngebäude, die Nutzungszeiten sind daher: täglich, 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr

c) *Klimadaten für die Berechnungen:*

Die Simulationen werden für alle Klimaregionen A, B und C durchgeführt. Dabei werden folgende Testreferenzjahre zugrunde gelegt:

Klimaregion A: Normaljahr TRY-Zone 2 (Rostock)

Klimaregion B: Normaljahr TRY-Zone 4 (Potsdam)

Klimaregion C: Normaljahr TRY-Zone 12 (Mannheim)

Anmerkung: Zusätzlich werden auch die Testreferenzjahre „extreme Sommer“ betrachtet, um klimatische Veränderungen mit erhöhten Temperaturen im Sommer zu berücksichtigen.

d) *Beginn der Simulationsrechnungen und Zeitraum für die Auswertung:*

Die Berechnungen werden für drei komplette Jahre durchgeführt und beginnen am 1. Januar an einem Montag um 0:00 Uhr. Es sind keine Feiertage und

Ferienzeiten bei der Ermittlung des Übertemperaturgradstundenwertes zu berücksichtigen. Alle Auswertungen beziehen sich auf das dritte Jahr der Berechnungen, um die anfängliche Erwärmung des Erdreichs in den ersten Jahren der Simulation einfließen zu lassen (vgl. Kapitel 3.5.3.4).

e) *Interne Wärmeeinträge:*

Der mittlere interne Wärmeeintrag ist bezogen auf die jeweils betrachtete Nettogrundfläche für Wohngebäude $100 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

Die als Tageswerte angegebenen Wärmeeinträge sind für die Berechnungen als konstante Wärmeeinträge während der Nutzungszeiten anzusetzen. Die Wärmeeinträge werden zu 100 % als konvektive Wärmeeinträge behandelt.

Anmerkung: Abweichend davon werden zwei Fälle erhöhter interner Wärmeeinträge simuliert, um deren Einfluss zu quantifizieren.

f) *Soll-Raumtemperatur für Heizzwecke (ohne Nachtabsenkung):*

Wohngebäude: $\theta_{h,\text{soll}} \geq 20 \text{ °C}$

Anmerkung: Da der Winterfall in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt wird, wird in den Simulationen eine „ideale Heizung“ angenommen, die eine konstante Raumtemperatur von 20 °C bereitstellt.

g) *Grundluftwechsel:*

Wohngebäude $n = 0,5 \text{ h}^{-1}$

Der gegebene Luftwechsel ist im Tagesgang konstant anzusetzen, wenn weder die Bedingungen für erhöhte Taglüftung nach h) dieses Abschnitts noch die Bedingungen für erhöhte Nachtlüftung nach i) dieses Abschnitts erfüllt sind.

h) *Erhöhter Tagluftwechsel:*

Überschreitet die Raumlufttemperatur 23 °C und liegt die Raumlufttemperatur über der Außenlufttemperatur, wird der mittlere Luftwechsel während der Aufenthaltszeit (Wohngebäude 6:00 Uhr bis 23:00 Uhr) bis auf $n = 3 \text{ h}^{-1}$ erhöht, um durch erhöhte Lüftung eine Überhitzung des Raumes zu vermeiden.

i) *Nachtluftwechsel:*

Außerhalb der Aufenthaltszeit (Wohngebäude 23:00 Uhr bis 6:00 Uhr)

- ist von dem Luftwechsel nach g) auszugehen, wenn nicht die Möglichkeit zur Nachtlüftung besteht;
 - darf der Luftwechsel auf $n = 2 \text{ h}^{-1}$ erhöht werden (erhöhte Nachtlüftung), wenn die Möglichkeit zur nächtlichen Fensterlüftung besteht;
- Bei der Wohnnutzung darf in der Regel von der Möglichkeit zu erhöhter

Nachtlüftung ausgegangen werden, wenn im zu bewertenden Raum oder Raumbereich die Möglichkeit zur nächtlichen Fensterlüftung besteht;

- darf der Luftwechsel auf $n = 5 \text{ h}^{-1}$ erhöht werden (hohe Nachtlüftung), wenn für den zu bewertenden Raum oder Raumbereich die Möglichkeit besteht, geschossübergreifende Lüftungsmöglichkeiten (z. B. Lüftung über angeschlossenes Atrium) zu nutzen, um den sich einstellenden Luftwechsel zu erhöhen;

Der gewählte Ansatz (keine, erhöhte oder hohe Nachtlüftung) wird in den entsprechenden Auswertungen dokumentiert. Für den Ansatz eines erhöhten oder hohen Nachtluftwechsels müssen die im Folgenden genannten Temperaturrandbedingungen gegeben sein:

$$\theta_{i,\text{Luft}} > \theta_{i,h,\text{soll}} \text{ UND } \theta_{i,\text{Luft}} > \theta_e$$

mit

$\theta_{i,\text{Luft}}$ [°C] Innenlufttemperatur

$\theta_{i,h,\text{soll}}$ [°C] Raum-Solltemperatur für Heizzwecke (Wohngebäude 20 °C)

θ_e [°C] Außenlufttemperatur

Anmerkung 1: Gemäß [DIN 4108-2:2013-02] ist bei Berücksichtigung der erhöhten oder hohen Nachtlüftung in den Simulationsrechnungen, ein Sonnenschutz vorzusehen, mit dem $g_{\text{tot}} \leq 0,4$ erreicht wird. Um dennoch die sommerlichen Raumtemperaturen bei hohen g_{tot} -Werten zu untersuchen, wird diese Anforderung im Rahmen der vorliegenden Arbeit außer Acht gelassen.

Anmerkung 2: Wie bereits in Kapitel 3.5.6.2 erläutert, werden für die Regelung des Luftwechsels im Falle erhöhter oder hoher Tag- und Nachtlüftung analog zur Bauteilaktivierung Schlafzimmer, Bad und Flur je Geschoss in der Simulation zusammengefasst.

j) *Steuerung Sonnenschutz:*

Es wird eine strahlungsabhängige Steuerung angesetzt. Für nordorientierte Fenster wird eine Grenzbestrahlungsstärke von 200 W/m^2 und für alle anderen Orientierungen eine Grenzbestrahlungsstärke von 300 W/m^2 (Summe aus Direkt- und Diffusstrahlung, außen vor dem Fenster) pro Quadratmeter Fensterfläche angenommen (vgl. Kapitel 3.5.6.3).

k) *Wärmeübergangswiderstände:*

Die Wärmeübergangswiderstände dürfen gemäß [DIN 4108-2:2013-02], wie für den Winterfall, konstant nach [DIN EN ISO 6946:2008-04], Tabelle 1, angesetzt werden.

Anmerkung: Die konstante Festlegung der Wärmeübergangswiderstände ist in TRNSYS nicht möglich, es können nur die konvektiven Anteile der Wärmeübergangskoeffizienten verändert werden. Die radiativen Anteile werden durch das Strahlungsmodell im Programm selbst berechnet. Eine Einflussnahme kann lediglich durch die Veränderung der Emissionsgrade erfolgen. Daher wird ein von der [DIN 4108-2:2013-02] abweichender Ansatz verfolgt, indem die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten nach Anhang A.1 [DIN EN ISO 6946:2008-04] und die radiativen Anteile durch TRNSYS bei einem Emissionsgrad gemäß [DIN EN ISO 6946:2008-04] von 0,9 berechnet werden.

Für die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten ergeben sich somit die in Tabelle 3-6 dokumentierten Werte.

Tabelle 3-6 konvektive Wärmeübergangskoeffizienten nach Anhang A.1 [DIN EN ISO 6946:2008-04].

konvektiver Wärmeübergangs- koeffizient innen und außen	Richtung des Wärmestroms					
	Aufwärts		Horizontal		Abwärts	
	[W/(m ² ·K)]	[kJ/(h·m ² ·K)]	[W/(m ² ·K)]	[kJ/(h·m ² ·K)]	[W/(m ² ·K)]	[kJ/(h·m ² ·K)]
h_{ci}	5,0	18,0	2,5	9,0	0,7	2,52
h_{ce}	20	72	20	72	20	72

Dabei wird der äußere konvektive Wärmeübergangskoeffizient nach folgender Gleichung ermittelt.

$$h_{ce} = 4 + 4 \cdot v \quad (3-7)$$

mit v [m/s] Windgeschwindigkeit über der Oberfläche.

Annahme: $v = 4$ m/s. Dies entspricht dem Wert, mit dem der äußere Wärmeübergangswiderstand in [DIN EN ISO 6946:2008-04], Tabelle 1 ermittelt wurde.

l) *Bauliche Verschattung:*

Abweichend vom Grundriss des MFH wird keine bauliche Verschattung durch die seitlichen und horizontalen Überhänge angenommen. Dies soll das Risiko einer Überbewertung der Verschattung und eines unter Umständen zu gut bewerteten sommerlichen Wärmeschutzes vermeiden. Hier wird somit auf der sicheren Seite liegend gerechnet.

m) *Passive Kühlung:*

Es wird eine Bauteilaktivierung mit Kühlung über die Sohlplatte eingesetzt. Die in Ansatz gebrachten Berechnungsmodelle sind in 3.5.2 und 3.5.3 beschrieben.

3.6.2 Bauliche Randbedingungen

3.6.2.1 Baukonstruktionen und Bauart

Die Bauteilaufbauten werden so konfiguriert, dass die leichte, mittlere und die schwere Bauart abgebildet werden. Dabei wird ein mittlerer Wert der auf die Grundfläche bezogenen wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk}/A_G für eine Wohnung berechnet. Die Bestimmung eines einheitlichen Wertes für C_{wirk}/A_G für jeden einzelnen Raum würde zu abweichenden Schichtdicken der Räume führen und somit zu unrealistischen Bauteilkonstruktionen. Gemäß [DIN 4108-2:2013-02] liegen folgende Einstufungen für die Bauart vor:

Leichte Bauart: $C_{\text{wirk}}/A_G < 50 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Mittlere Bauart: $50 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \leq C_{\text{wirk}}/A_G \leq 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Schwere Bauart: $C_{\text{wirk}}/A_G > 130 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Die mittlere Bauart wird durch den Wert $90 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ repräsentiert. Die leichte Bauart soll knapp unter der Grenze zur mittleren und die schwere knapp über der Grenze liegen, die Zielwerte betragen somit $49 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und $131 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Die Bauteilaufbauten basieren auf den in [DIN EN ISO 13791:2012-08], Tabelle 14 angegebenen Bauteilen, werden jedoch zur möglichst genauen Abbildung der drei Zielwerte um weitere Materialien erweitert, welche [DIN 4108-4:2013-02] und [DIN EN 12524:2000-07] entnommen sind. Alle verwendeten Materialien sind in Tabelle 3-7 aufgeführt.

Ein punktgenaues Erreichen der Werte könnte durch eine Justierung über die Putzschichten erzielt werden, da dies jedoch zu ungewöhnlichen Putzdicken führen würde, wird hierauf verzichtet. Die Justierung über die Estrichdicke ist aufgrund der nötigen Unterbringung der Rohre für die Bauteilaktivierung nicht möglich, die Estrichdicke beträgt immer 6 cm. Die Abweichungen der Werte von den Zielwerten für die wirksame Wärmespeicherfähigkeit sind jedoch auch ohne Feinjustierung gering. Sie betragen schließlich $48,96 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $90,6 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und $130,9 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Tabelle 3-7 Verwendete Baumaterialien und ihre Eigenschaften.

Baumaterial	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	c_p [kJ/(kg·K)]	Quelle
Innenputz	0,7	1400	0,85	[DIN EN ISO 13791:2012-08]
Leichtputz	0,25	700	0,85	[DIN 4108-4:2013-02]
Wärmedämmputz	0,08	200	0,85	[DIN 4108-4:2013-02]
Akustikplatte	0,06	400	0,84	[DIN EN ISO 13791:2012-08]
Gipskartonplatte	0,25	800	0,85	[DIN 4108-4:2013-02]
Außenputz	1,0	1800	0,85	[DIN 4108-4:2013-02]
Kalksandstein	0,99	1800	1,0	[DIN 4108-4:2013-02]
Porenbeton	0,16	500	1,0	[DIN 4108-4:2013-02]
Beton	2,1	2400	0,85	[DIN EN ISO 13791:2012-08]
Zementestrich	1,4	2000	0,85	[DIN EN ISO 13791:2012-08]
Kunststoffbelag	0,23	1500	1,5	[DIN EN ISO 13791:2012-08]
Bitumenbahn	0,23	1100	1,0	[DIN EN 12524:2000-07]
Dämmschicht WLG 040	0,04	50	0,85	[DIN EN ISO 13791:2012-08]
Dämmschicht WLG 035	0,035	50	0,85	[DIN EN ISO 13791:2012-08]*
Dämmschicht WLG 030	0,03	50	0,85	[DIN EN ISO 13791:2012-08]*

* modifiziert

Weiterhin werden verschiedene Wärmeschutzniveaus untersucht. Zu diesem Zweck wird die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung variiert, um auch bei sehr niedrigen U-Werten moderate Bauteildicken zu erzeugen. Als Basis werden übliche U-Werte für Neubauten (Typ 1) angesetzt. Abweichend davon werden verschiedene Außenwände zur Abbildung eines verbesserten Neubauniveaus (Typ 2 und 3) sowie eines modernisierten Altbaus (Typ 4) angesetzt. Auch für die Kellerdecke wird ein verbesserter U-Wert untersucht (Typ 2). Für den Fall, dass der Keller beheizt und somit die Bodenplatte gedämmt ausgeführt wird, wird die Kellerdecke nicht mit einer zusätzlichen Dämmung versehen (Typ 3). Die Bodenplatte wird ebenfalls mit zwei verschiedenen U-Werten abgebildet, dabei wird unterschieden zwischen unter- und oberseitiger Dämmung. Im Falle des unbeheizten Kellers wird die Bodenplatte ohne zusätzliche Dämmung (dennoch mit schmaler Dämmung zwischen Bodenplatte und Estrich) ausgeführt. Der U-Wert des Dachs wird nicht variiert. Die angesetzten Kennwerte für die Wärmeschutzniveaus sind in Tabelle 3-8 dokumentiert. Die genauen Bauteilaufbauten können Anhang C entnommen werden.

Tabelle 3-8 Kennwerte der Außenbauteile für die untersuchten Wärmeschutzniveaus.

Bauteilbezeichnung	U-Wert [W/(m ² ·K)]	Niveau
Außenwand Typ 1	0,20	normal
Außenwand Typ 2	0,16	verbessert
Außenwand Typ 3	0,12	optimiert
Außenwand Typ 4	0,24	Altbau modernisiert
Kellerdecke Typ 1	0,24	normal, Keller unbeheizt
Kellerdecke Typ 2	0,18	verbessert, Keller unbeheizt
Kellerdecke Typ 3	0,66	ungedämmt, Keller beheizt
Bodenplatte Typ 1	0,24	normal, Keller beheizt, unterseitig gedämmt
Bodenplatte Typ 2	0,18	verbessert, Keller beheizt, unterseitig gedämmt
Bodenplatte Typ 3	0,24	normal, Keller beheizt, oberseitig gedämmt
Bodenplatte Typ 4	0,18	verbessert, Keller beheizt, oberseitig gedämmt
Bodenplatte Typ 5	0,71	ungedämmt, Keller unbeheizt
Dach	0,16	normal

Die Fenster des Modells werden mit einem 2-fach-Wärmeschutzglas ausgestattet. Da die Modellierung eines Fensters mit dem Tool WINDOW (vgl. Kapitel 3.1) eine genaue Kenntnis zahlreicher Fensterbausteine und deren Eigenschaften erfordert, wurde ein Fenster aus der integrierten Programmbibliothek (WinID-Lib) ausgewählt. Die in der Bibliothek angegebenen Kennwerte für den U_g -Wert des Glases und den Gesamtenergiedurchlassgrad g (englisch: SHGC, solar heat gain coefficient) stellen nur einen Referenzwert dar, welcher unter festgelegten Randbedingungen ermittelt wird. Da U und g von den Scheiben-, Raum- und Außenlufttemperaturen sowie der Anordnung des Fensters abhängen, werden die Werte von TRNSYS für jeden Zeitschritt berechnet und weichen von den Referenzwerten ab [Transsolar o. J.]. Aus diesem Grund wurden die durch TRNSYS ermittelten U - und g -Werte stündlich ausgegeben und ein Mittelwert gebildet: Das gewählte 2-fach verglaste Fenster verfügt gemäß Simulation im Mittel über einen g -Wert von 0,55 und einen U_w -Wert von ca. 1,3 W/(m²K) bei einem U_f -Wert des Rahmens von 1,4 W/(m²K). Der U_f -Wert kann im Type 56 über den Wärmedurchlasswiderstand manuell eingegeben werden. Der Rahmenanteil der Fenster wird mit 30 % angenommen. Tabelle 3-9 zeigt zum einen die Näherungswerte aus der Programmbibliothek und zum anderen die durch TRNSYS berechneten gemittelten Kennwerte.

Tabelle 3-9 Kennwerte der Fenster gemäß Programmbibliothek und Simulation.

Bauteilbezeichnung	U _F -Wert Eingabe [W/(m ² ·K)]	U _g -Wert WinID-Lib [W/(m ² ·K)]	g-Wert WinID-Lib [-]	g-Wert Simulation [-]	U _w -Wert Simulation [W/(m ² ·K)]
Fenster 2-fach	1,4	0,81	0,632	0,55	1,3

3.6.2.2 Sonnenschutz

Der Sonnenschutz wird über den Abminderungsfaktor F_c variiert und in TRNSYS stets als externer Faktor eingegeben. Eventuelle interne Strahlungsvorgänge zwischen Fenster und Sonnenschutz bleiben somit unberücksichtigt. Der Abminderungsfaktor F_c variiert zwischen 0 und 1, wobei der Wert 0 aufgrund des fehlenden Tageslichteinfalls keinen realisierbaren Wert darstellt und nur zur Information in die Berechnung miteingeht.

3.6.3 Erdreichparameter

Um verschiedene Erdreieigenschaften abzubilden, werden vier Varianten für die Bodenkennwerte untersucht, welche in Tabelle 3-10 angegeben sind. Die Kennwerte wurden auf Basis der [VDI 4640-1:2010-06], Tabelle 1 ausgewählt.

Tabelle 3-10 Kennwerte der untersuchten Varianten der Erdreieigenschaften nach Tabelle 1 in [VDI 4640-1:2010-06].

Variante	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	spez. Wärme- kapazität c_p [kJ/(kg·K)]	Produkt $\rho \cdot c_p$ [kJ/(m ³ ·K)]
E05	0,5	2000	0,75	1500
E15	1,5	2000	1,00	2000
E25	2,5	2200	1,00	2200
E35	3,5	2400	1,00	2400

Jede Variante repräsentiert unterschiedliche Gesteinstypen. So handelt es sich beispielsweise bei Variante E05 überwiegend um trockene Lockergesteine, wie trockenen Ton/Schluff, trockenen Sand oder trockene(n) Kies/Steine. Mögliche Gesteinstypen zu den gewählten Erdreichvarianten sind in Tabelle 3-11 dokumentiert. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die Kennwerte auch innerhalb eines einzelnen Gesteinstyps je nach Wassergehalt und Lagerungsdichte stark variieren können. Insbesondere bei Sandstein liegt eine hohe Bandbreite hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit vor. Diese schwankt zwischen 1,9 und 4,6 W/(m·K), wobei hier neben Wassersättigung, Kornmaterial und -verteilung auch die Art des Bindemittels und der Matrix Einfluss haben [VDI 4640-1:2010-06]. Im Hinblick auf diese Schwankungen ist Sandstein sowohl in Variante E25 als auch E35 als Beispiel aufgeführt.

Tabelle 3-11 Beispiele für Gesteinstypen der untersuchten Varianten nach Tabelle 1 in [VDI 4640-1:2010-06].

Variante	Gesteinstypen
E05	trockene Lockergesteine wie Ton/Schluff trocken, Sand trocken, Kies/Steine trocken
E15	Ton/Schluff wassergesättigt, Sand feucht
E25	Sand wassergesättigt, Kies/Steine wassergesättigt, Geschiebemergel/-lehm, Sandstein
E35	verschiedene Festgesteine wie Sandstein, Kalkstein, Dolomitstein, Granit

3.6.4 Übersicht der variierten Parameter und Definition des Basisfalls

Für die Untersuchung der Potentiale der Sohlplattenkühlung werden zahlreiche Parametervariationen durchgeführt. Zur vereinfachten Darstellung wurde jedem Parameter ein Kürzel zugewiesen, welches analog in den grafischen Auswertungen in Kapitel 4 bis 7 Verwendung findet. Eine Gesamtübersicht der Parameter findet sich in der nachfolgenden Tabelle 3-12. Dabei wurde ein Basisfall definiert, der für Vergleiche herangezogen wird. Dieser ist in der Parameterübersicht mit **(Basis)** gekennzeichnet.

Tabelle 3-12 Übersicht der variierten Parameter. Der Basisfall ist jeweils fettgedruckt und mit (Basis) gekennzeichnet.

Kategorie	Kürzel	Erläuterung
passive Kühlung	oK SPK (Basis)	ohne Kühlung mit Sohlplattenkühlung
Heizung und Luftwechsel im Kellergeschoss	KoH KH15 (Basis) KH20	Keller ohne Heizung Keller niedrig beheizt $\theta_{i,h,soll} = 15\text{ °C}$ Keller normal beheizt $\theta_{i,h,soll} = 20\text{ °C}$
	KL0 KL05	Grundluftwechsel im Keller $n_{Grund} = 0\text{ h}^{-1}$ Grundluftwechsel im Keller $n_{Grund} = 0,5\text{ h}^{-1}$
Erdreichparameter	E05 E15 (Basis) E25 E35	Die Wärmeleitfähigkeit für das Erdreich variiert zwischen $0,5\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und $3,5\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Dabei werden auch die anderen Erdreischeigenschaften variiert, siehe Tabelle 3-10.
Rohrdurchmesser	dSPK20 dSPK25 (Basis)	Rohrdurchmesser der Sohlplattenkühlung 20 [25] mm
	dBTA14 dBTA16 (Basis) dBTA20	Rohrdurchmesser der Bauteilaktivierung 16 [14, 20] mm
Rohrabstände	xSPK20 xSPK30 (Basis) xSPK40	Rohrabstand der Sohlplattenkühlung 30 [20, 40] cm
	xBTA12 xBTA15 (Basis) xBTA18 xBTA20	Rohrabstand der Bauteilaktivierung 15 [12, 18, 20] cm
Art der Bauteilaktivierung	FBT (Basis) BKT oBKT	Fußbodentemperierung Betonkernaktivierung Oberflächennahe Betonkernaktivierung
Massenstrom	m-var1000 m-var1500 (Basis) m-var2000 m-const1500	Massenstrom Sohlplattenkühlung 1500 [1000, 2000] kg/h var = variable Regelung; const = konstante Regelung vgl. 3.5.6
Wärmeschutz der einzelnen Bauteile	AWnorm (Basis) AW+ AW++ AWalt+	Außenwand normal verbessert höchster Wärmeschutz Altbau modernisiert
	KDnorm KD+ KDoD (Basis)	Kellerdecke normal verbessert ohne Dämmung (Keller unbeheizt)
	BPus BPus+ BPos (Basis) BPos+ BPoD	Bodenplatte unterseitig gedämmt, normal, unterseitig gedämmt, verbessert oberseitig gedämmt, normal oberseitig gedämmt, verbessert ohne Dämmung (Keller unbeheizt)
	FENnorm (Basis) FEN+	Fenster normal, verbessert

(Fortsetzung Tabelle 3-12)

Kategorie	Kürzel	Erläuterung
Bauart	L M (Basis) S	leichte Bauart mittel Bauart schwer Bauart
Sonnenschutz	FC0, FC02, ... , FC10	Der Abminderungsfaktor F_C für den Sonnenschutz wird zwischen 0 und 1 variiert, mit Abständen von 0,2.
Taglüftung (während der Anwesenheit von 6:00 Uhr bis 23:00 Uhr)	oTL TL3 (Basis)	ohne erhöhte Taglüftung ($n_{\text{Grund}} = 0,5 \text{ h}^{-1}$) erhöhte Taglüftung mit $n = 3 \text{ h}^{-1}$ (jeweils bei Überschreitung $\theta_i > 23 \text{ °C}$ und $\theta_i > \theta_e$, sonst n_{Grund})
Nachtlüftung (außerhalb der Anwesenheit von 23:00 Uhr bis 6:00 Uhr)	oNL (Basis) NL2 NL5	ohne erhöhte Nachtlüftung ($n_{\text{Grund}} = 0,5 \text{ h}^{-1}$) erhöhte Nachtlüftung mit $n = 2 \text{ h}^{-1}$ hohe Nachtlüftung mit $n = 5 \text{ h}^{-1}$ (jeweils bei Überschreitung $\theta_i > 20 \text{ °C}$ und $\theta_i > \theta_e$, sonst n_{Grund})
Interne Wärmeeinträge	IW100 (Basis) IW120 IW140	Interne Wärmeeinträge 100 [120, 140] Wh/(m ² ·d)
Klimadaten	TRY02, TRY04 (Basis) , TRY12, TRY02som, TRY04som, TRY12som, TRY04zuk	Testreferenzjahre „mittleres Jahr“ für die jeweilige Klimaregion (A, B, C) Testreferenzjahre „extreme Sommer“ für die jeweilige Klimaregion (A, B, C) Testreferenzjahr „Zukunft“ für Klimaregion B
Orientierung	O, W (Basis)	Längsseite der Wohnung orientiert nach Osten oder Westen
Geschosszahl	GZ3 (Basis) , GZ4, ..., GZ10	Anzahl der Geschosse

4 Parameterstudie zum sommerlichen Wärmeschutz

Das folgende Kapitel dokumentiert die Simulationsergebnisse zum kleinen Mehrfamilienhaus hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes. Zunächst erfolgt eine Darstellung des Referenzfalls ohne passive Kühlung. Dieser entspricht hinsichtlich seiner Randbedingungen dem Basisfall, es wird jedoch keine Kühlung eingesetzt. Anschließend folgt eine Auswertung des in Tabelle 3-12 dokumentierten Basisfalls, welcher im Rahmen der Parameterstudie anderen Fällen gegenübergestellt wird. Somit liegt jeder Parametervariation eine einheitliche Vergleichsbasis zugrunde. Die Parameterstudie ist in Teilen auch in [Radermacher und Maas 2018] veröffentlicht.

Die Auswertungen zeigen die Übertemperaturgradstunden in Abhängigkeit vom Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes F_c . Zusätzlich ist der Grenzwert der Übertemperaturgradstunden für Wohngebäude nach [DIN 4108-2:2013-02] mit 1200 Kh/a eingetragen. So ist auf einfache Weise sichtbar, welche Qualität ein Sonnenschutz aufweisen müsste, damit die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz eingehalten werden. Außenliegende Sonnenschutzvorrichtungen weisen üblicherweise F_c -Werte von 0,25 (Jalousie/Raffstore, 45°-Stellung) bis 0,50 (Vordächer/Markisen) auf, innenliegende Werte von 0,65 (weiß/hoch reflektierend) bis 0,9 (dunkle Farben/höhere Transparenz).

4.1 Referenzfall ohne Kühlung

Der Referenzfall ohne passive Kühlung ist in Bild 4-1 zu sehen. Er ist für alle Räume der westlich orientierten Gebäudehälfte und alle drei Geschosse (im Folgenden bezeichnet mit Erdgeschoss (EG), Obergeschoss (OG) und Dachgeschoss (DG)) dokumentiert.

Die östlich orientierte Gebäudehälfte weist leicht geringere Übertemperaturgradstunden auf, die Temperaturen verhalten sich ansonsten ähnlich wie im westlichen Gebäudeteil. Dies ist nicht ungewöhnlich, denn nach Westen orientierte Räume weisen üblicherweise aufgrund der höheren Außentemperatur am Nachmittag, verbunden mit der zeitgleich einfallenden Solarstrahlung, ein höheres Überhitzungsrisiko auf. Eine weitere Auswertung der Simulationsergebnisse zur Osthälfte erfolgt daher nicht.

Unschwer erkennbar ist, dass das Wohnzimmer den kritischsten der vier Räume darstellt. Die Räume Schlafzimmer, Bad und Flur weisen ein geringfügiges Überhitzungsrisiko auf. Die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz können hier in den meisten Fällen ohne Sonnenschutzvorrichtung eingehalten werden.

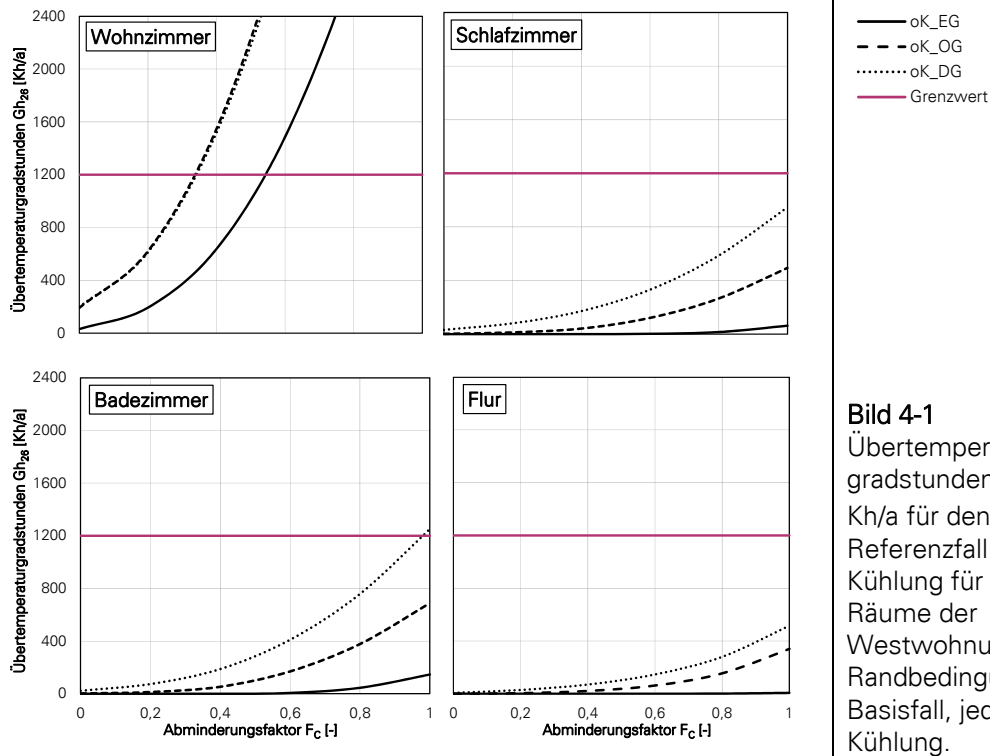


Bild 4-1
 Übertemperaturgradstunden Gh_{26} in Kh/a für den Referenzfall ohne Kühlung für die vier Räume der Westwohnungen. Randbedingungen wie Basisfall, jedoch ohne Kühlung.

Grund ist zum einen die Orientierung – das Schlafzimmer verfügt je etwa zur Hälfte über Nord- und Westfenster – und zum anderen der gegenüber dem Wohnzimmer geringere Fensterflächenanteil in allen drei Räumen. Das Wohnzimmer weist hingegen verhältnismäßig hohe Fensterflächenanteile nach Westen sowie Süden auf, sodass die solare Einstrahlung bei fehlendem Sonnenschutz zu sehr hohen Raumtemperaturen führt. Nur durch einen außenliegenden Sonnenschutz ($F_c \leq 0,3$) würde der Grenzwert der Übertemperaturgradstunden unterschritten.

In Schlafzimmer, Bad und Flur weist das Dachgeschoss das höchste Überhitzungsrisiko auf, während beim Wohnzimmer im Obergeschoss ein leicht höheres Überhitzungsrisiko als im Dachgeschoss zu beobachten ist. Dies kann darin begründet sein, dass sich die Möglichkeit einer Wärmeübertragung über das Dach nach außen bei sehr hohen Raumtemperaturen günstig auf die Raumtemperaturen im Dachgeschoss auswirkt, während sich die Wärme im Obergeschoss staut. Bei weniger hohen Raumtemperaturen überwiegt hingegen der Einfluss der solaren Einstrahlung auf das Dach, sodass es hier im Obergeschoss etwas kühler ist. Das Erdgeschoss weist erwartungsgemäß die geringsten Übertemperaturgradstunden auf, da es durch die Angrenzung an das kühlere Kellergeschoss einen Teil der Raumwärme nach unten abführen kann.

4.2 Basisfall

Bild 4-2 zeigt den in Kapitel 3.6.4 definierten Basisfall mit Sohlplattenkühlung für alle vier Räume und Geschosse der westlichen Gebäudehälfte. Hier ist die gegenüber dem Fall ohne Kühlung deutliche Wirksamkeit der Sohlplattenkühlung erkennbar.

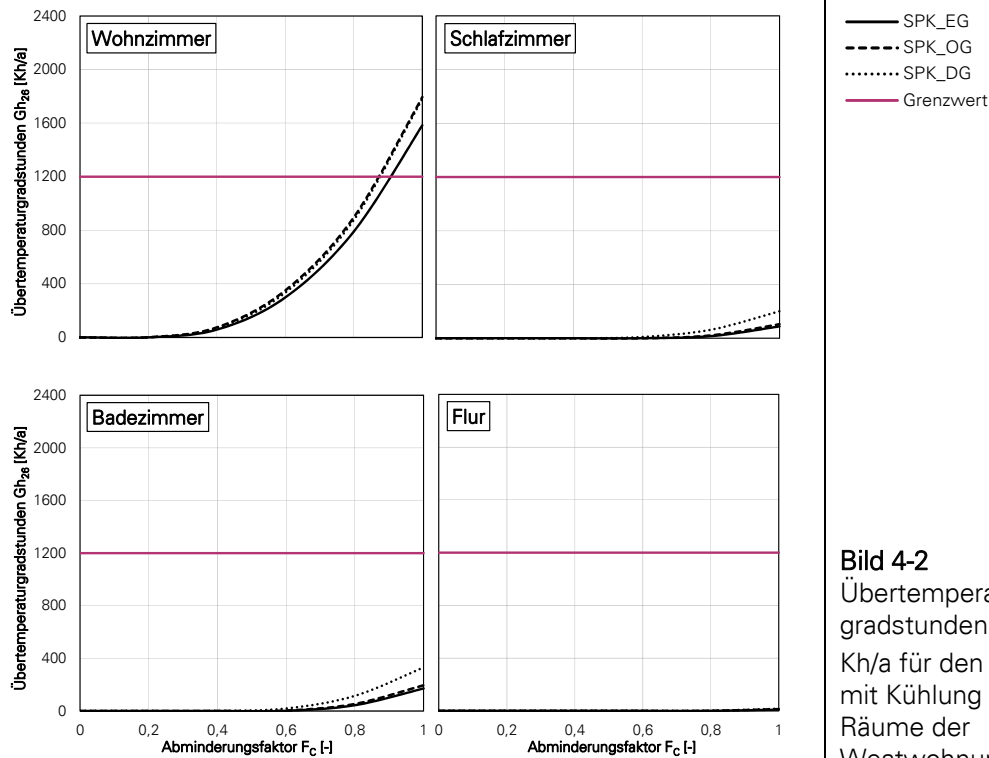


Bild 4-2
Übertemperaturgradstunden G_{h26} in Kh/a für den Basisfall mit Kühlung für die vier Räume der Westwohnungen.

Insgesamt betrachtet ist eine hohe Effizienz des passiven Kühlsystems der Sohlplattenkühlung festzustellen. Die Übertemperaturgradstunden sinken in hohem Maße, sodass in den Räumen Schlafzimmer, Bad und Flur ohne Komforteinbußen auf einen Sonnenschutz verzichtet werden kann. Sogar im Wohnzimmer ist eine Einhaltung der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz noch bei einem F_c -Wert von 0,85 möglich.

4.3 Parametervariation

Das folgende Kapitel zeigt die Simulationsergebnisse der Parametervariation. Da die Räume Schlafzimmer, Bad und Flur sehr niedrige Übertemperaturgradstunden aufweisen, ist eine Untersuchung der Einflüsse verschiedener Parameter in diesen Räumen wenig aufschlussreich. Daher werden im Folgenden nur die Simulationsergebnisse des Wohnzimmers dokumentiert. Dieses weist im Obergeschoss in der Regel die höchsten Übertemperaturgradstunden auf und stellt hier somit den kritischsten Raum des Gebäudes dar, weshalb die folgenden Auswertungen nur

diesen Raum betreffen. Dabei beziehen sich die Ergebnisse immer auf das dritte Jahr der Berechnungen. Mit der Angabe „(Basis)“ ist jeweils kenntlich gemacht, welcher Fall dem oben beschriebenen Basisfall entspricht.

4.3.1 Luftwechsel

Bild 4-3 zeigt verschiedene Variationen des Luftwechsels. Als Vergleichswerte sind darüber hinaus dieselben Luftwechselkonfigurationen für das Wohnzimmer ohne Sohlplattenkühlung in grau dargestellt, um den Nutzen der Sohlplattenkühlung zu veranschaulichen.

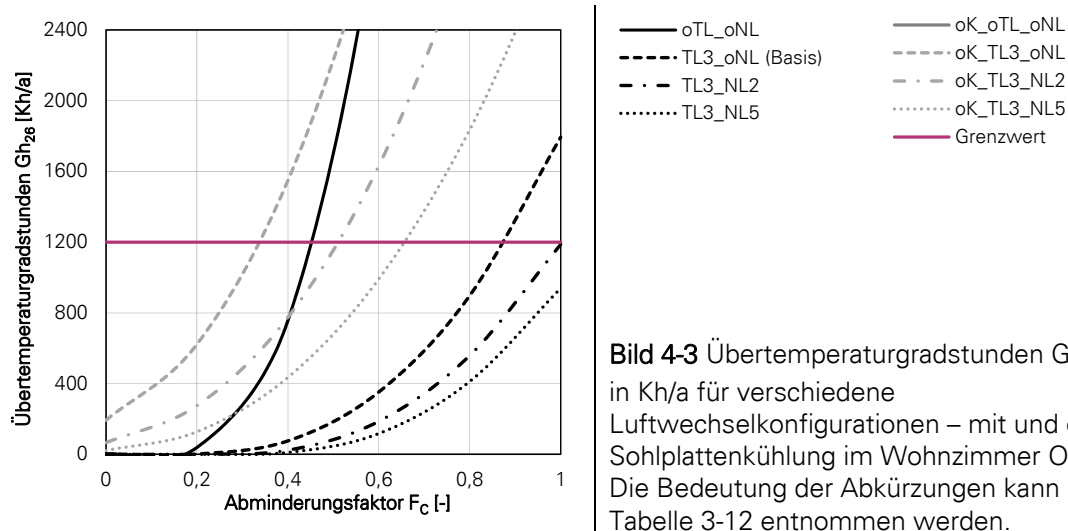


Bild 4-3 Übertemperaturgradstunden Gh_{26} in Kh/a für verschiedene Luftwechselkonfigurationen – mit und ohne Sohlplattenkühlung im Wohnzimmer OG. Die Bedeutung der Abkürzungen kann Tabelle 3-12 entnommen werden.

Der Fall „ohne Kühlung, ohne Tag- und Nachtlüftung (oK_oTL_oNL)“ ist in der Grafik nicht sichtbar, da die Übertemperaturgradstunden bereits bei einem F_c -Wert von 0 derart hoch sind, dass sie außerhalb der Ordinatengrenze liegen. Wird jedoch die Sohlplattenkühlung verwendet (oTL_oNL), so können die Anforderungen noch mit einem F_c -Wert von maximal ca. 0,45 eingehalten werden. Die Anwendung einer erhöhten Taglüftung (TL3_oNL) in Kombination mit der Sohlplattenkühlung senkt die Übertemperaturgradstunden maßgeblich, sodass die Anforderungen bereits mit einem F_c -Wert von 0,85 eingehalten werden, bei zusätzlicher Nachtlüftung (TL3_NL2/TL3_NL5) sogar bei fehlendem Sonnenschutz. Insofern kann die Aussage getroffen werden, dass die Sohlplattenkühlung eine fehlende Möglichkeit zur Nachtlüftung kompensieren kann und dass sie kombiniert mit einer Tag- und Nachtlüftung die Belastung durch hohe Raumtemperaturen bei fehlendem Sonnenschutz stark senken kann. Es wird jedoch auch ersichtlich, dass die Möglichkeit zur Erhöhung des Luftwechsels, sei es durch eine natürliche oder eine maschinelle Lüftung, stets gegeben sein sollte, um das Risiko überhöhter Raumtemperaturen zu senken.

4.3.2 Bauart

In Bild 4-4 ist der Einfluss der Bauart zu sehen. Im Falle der leichten und mittleren Bauart wurde ein Wandaufbau mit Porenbetonsteinen gewählt, bei der schweren Bauart mit Kalksandsteinen. Die leichte Bauart zeichnet sich gegenüber der mittleren zusätzlich durch eine abgehängte Decke aus, sodass hier die Speichermasse der Decke nicht nutzbar ist.

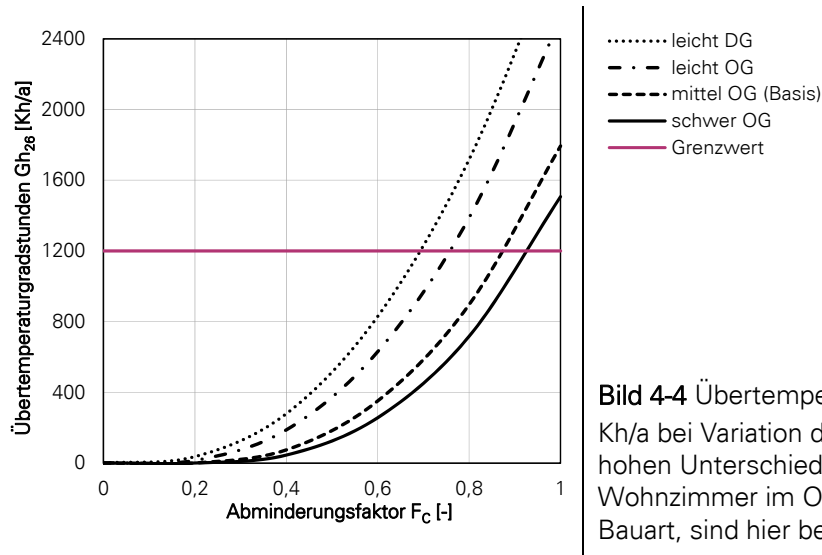


Bild 4-4 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation der Bauart. Aufgrund des hohen Unterschieds zwischen dem Wohnzimmer im OG und im DG bei leichter Bauart, sind hier beide dargestellt.

Die leichte Bauart des Gebäudes ($C_{\text{Wirk}}/A_G = 49 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) wirkt sich, wie zu erwarten, ungünstig auf den Nutzen der Sohlplattenkühlung aus. Da hier ausnahmsweise der Unterschied zwischen Ober- und Dachgeschoss verhältnismäßig hoch ist, werden die Ergebnisse beider Geschosse dargestellt. Im Dachgeschoss sinkt der erforderliche maximale F_c -Wert von 0,85 bei mittlerer Bauart auf etwa 0,65 bei leichter Bauart. Eine schwere Bauart ($C_{\text{Wirk}}/A_G = 131 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) verringert das Überhitzungsrisiko, sodass ein F_c -Wert von ca. 0,9 für das Einhalten der Anforderungen ausreichend wäre.

4.3.3 Geschosszahl

Durch eine hohe Geschosszahl des Gebäudes wird die Wirksamkeit der Sohlplattenkühlung stark beeinträchtigt. Dies hängt mit dem zur Verfügung stehenden Massenstrom in den einzelnen Geschossdecken zusammen, mit der sich verändernden Fluidtemperatur sowie mit der begrenzten Größe der Sohlplatte und damit begrenzten Wärmeaufnahme zusammen. Die Untersuchung des Einflusses erfolgte nach folgendem Zusammenhang: Der Massenstrom in der Sohlplatte beträgt bis zu 1500 kg/h . Das zirkulierende Wärmeträgerfluid (Wasser) teilt sich anteilig auf die Geschossdecken auf, sodass bei einer Geschosszahl von 3 ein Massenstrom von 500 kg/h je Geschossdecke verfügbar ist. Die mittlere

Austrittstemperatur aus den thermisch aktivierten Decken entspricht der Eintrittstemperatur in die Sohlplatte. Eine höhere Geschoszahl führt zu einem geringeren verfügbaren Massenstrom je Geschosdecke und erhöht zudem die Eintrittstemperatur in die Sohlplatte.

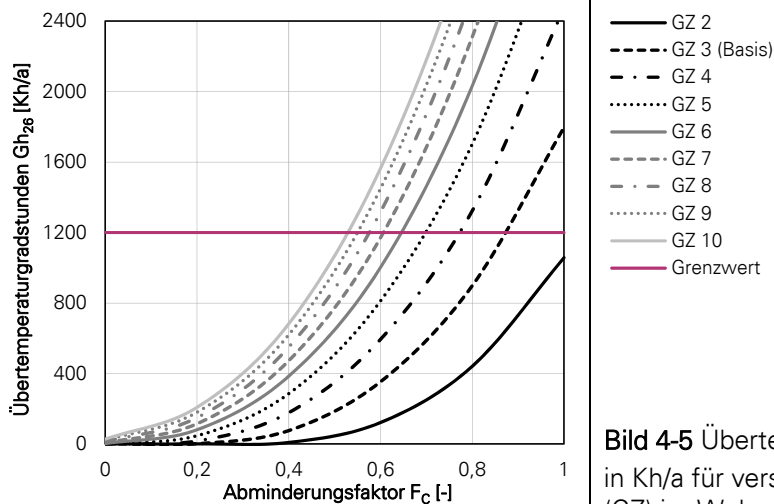


Bild 4-5 Übertemperaturgradstunden Gh_{26} in Kh/a für verschiedene Geschoszahlen (GZ) im Wohnzimmer OG.

Bei einer Geschoszahl von 10 liegt der erforderliche F_c -Wert bei knapp über 0,50, während im Basisfall (Geschoszahl 3) ein F_c -Wert von 0,85 ausreichend ist. Insofern bestätigt sich die aufgestellte These, dass eine Sohlplattenkühlung bei Gebäuden mit einer hohen Zahl an Geschossen, wie es bei Bürogebäuden häufig der Fall ist, wenig empfehlenswert ist. Hier sollten sinnvollerweise andere Systeme, wie eine Kühlung über Erdwärmesonden oder Grundwasserbrunnen, die eine höhere Kühlleistung erbringen, Anwendung finden.

4.3.4 Unterer Gebäudeabschluss

Bild 4-6 dokumentiert, wie sich eine Veränderung der Kellernutzung auf die Übertemperaturgradstunden auswirkt. Es wurden dabei die Folgen eines Grundluftwechsels von $0,5 \text{ h}^{-1}$ und die Änderungen der Übertemperaturgradstunden im Falle eines unbeheizten (oKH), niedrig beheizten (KH15) oder normal beheizten Kellers (KH20). Dafür wurde die Raum-Solltemperatur $\theta_{i,h,soll}$ für die Beheizung im Kellergeschoss (ideale Heizung, vgl. Kapitel 3.6.1) variiert. Im Basisfall wurde ein Grundluftwechsel von 0 h^{-1} und eine Raum-Solltemperatur von 15 °C angesetzt, um einen für die Kühlperiode ungünstigeren Fall abzubilden.

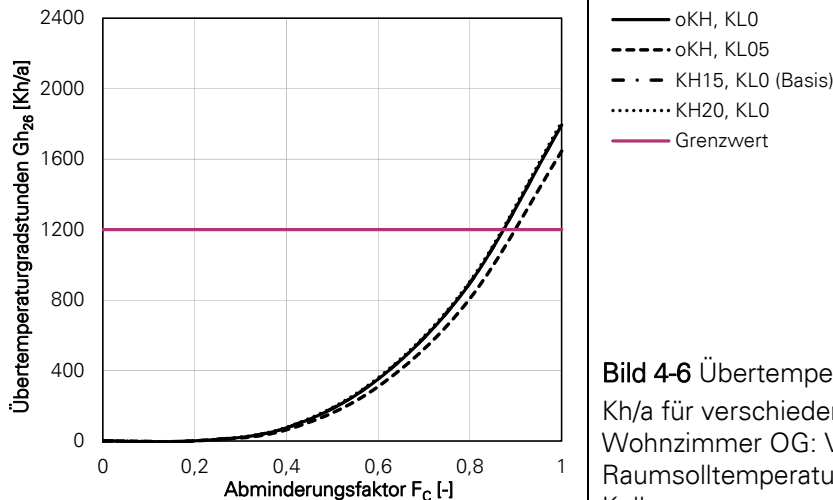


Bild 4-6 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für verschiedene Kellernutzungsarten im Wohnzimmer OG: Variation Raumsolltemperatur und Luftwechsel im Keller.

Eine Veränderung der Raum-Solltemperatur allein wirkt sich bei dem vorliegenden Simulationsmodell kaum auf die Übertemperaturgradstunden aus. Die Annahme eines konstanten Grundluftwechsels führt zu einer leichten Verbesserung. Es ist jedoch nicht eindeutig klar, ob diese Unterschiede durch den Einfluss der Kellerraumtemperatur auf die Sohlplatte zustande kommen oder durch die erhöhte Temperaturdifferenz zwischen Erd- und Kellergeschoss, welche dazu führt, dass mehr Wärme aus dem Erdgeschoss über die Kellerdecke abgeführt wird. Dieselbe Problematik ergibt sich bei einer Variation der Bodenplattenkonstruktion (Bild 4-7).

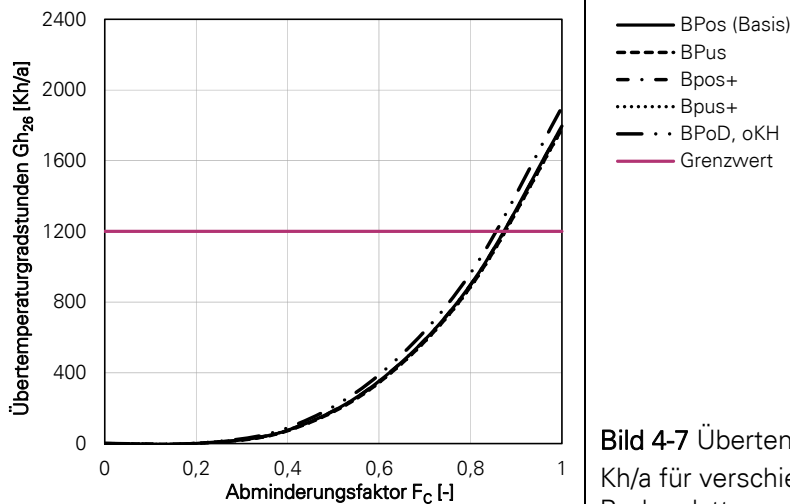


Bild 4-7 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für verschiedene Konstruktionen der Bodenplatte.

Auch hier zeigen sich geringfügige Unterschiede bei den Übertemperaturgradstunden. Lediglich die Bodenplatte ohne Dämmung (stattdessen Dämmung der Kellerdecke) führt zu leicht erhöhten Übertemperaturgradstunden. Doch unklar ist, ob die Übertemperaturen eher auf die verminderte Wärmeabfuhr aus dem

Erdgeschoss in das Kellergeschoss als auf eine erhöhte Erwärmung der Sohlplatte zurückzuführen sind.

Der nicht eindeutige Sachverhalt hängt mit dem Simulationsmodell zusammen, das die Sohlplattenkühlung nicht optimal abbilden kann, wie in Kapitel 3.5.3 ausgeführt. Der Einfluss der Eigenschaften des unteren Gebäudeabschlusses auf die Temperaturen in der Sohlplatte kann nicht zuverlässig beurteilt werden. Eine TRNSYS-Komponente, welche die Wärmeleitungsvorgänge zwischen Erdreich, Gebäude und den wasserführenden Rohren ganzheitlich berücksichtigt, wäre für diese Analyse wünschenswert.

4.3.5 Wärmeschutzniveau Außenwände

Für die Variation des Wärmeschutzniveaus der Außenwände werden vier Varianten betrachtet. Im Basisfall (AWnorm) liegt ein für Neubauten üblicher Wärmedurchgangskoeffizient U von $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ vor. Die Variante AWalt+ repräsentiert einen modernisierten Altbau mit einem U -Wert von $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, die Varianten AW+ und AW++ einen Neubau mit erhöhtem Wärmeschutz (U -Werte $0,16$ und $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Die Ergebnisse sind Bild 4-8 zu entnehmen.

Der modernisierte Altbau mit dem höheren U -Wert weist die geringsten Übertemperaturgradstunden auf, jedoch sind die Veränderungen durch Variation des U -Wertes verschwindend gering. Insofern ist keine Verschlechterung des sommerlichen Wärmeschutzes durch ein erhöhtes Wärmeschutzniveau sichtbar.

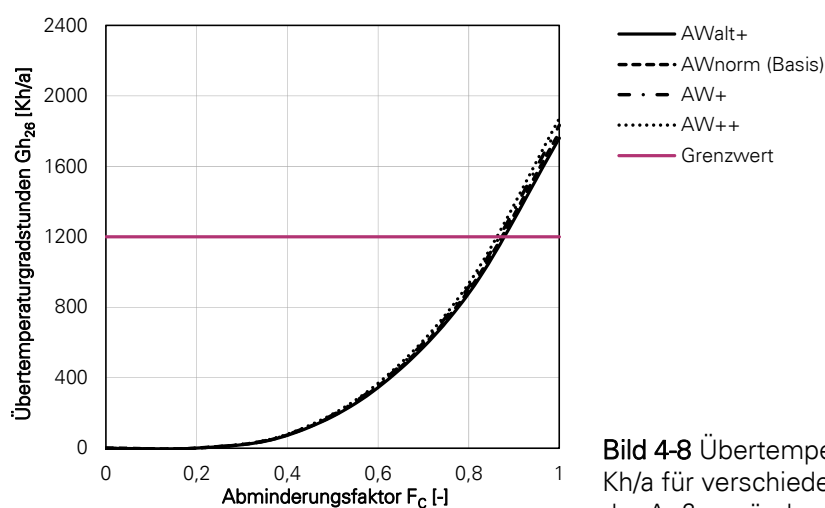


Bild 4-8 Übertemperaturgradstunden G_{h26} in Kh/a für verschiedene Wärmeschutzniveaus der Außenwände.

4.3.6 Massenstrom

Eine Verringerung des maximal verfügbaren Massenstroms in der Sohlplatte auf 1000 kg/h hat einen eher geringen Einfluss, wie in Bild 4-9 dargestellt. Auch eine Erhöhung des Massenstroms auf 2000 kg/h bewirkt keine wesentliche Veränderung. Zusätzlich wurde untersucht, wie sich eine abweichende Regelung des Massenstroms auswirkt, bei der dieser konstant 1500 kg/h beträgt, sobald die Raumtemperatur einer Zone auf über 23 °C steigt. Hierbei steigen die Übertemperaturgradstunden leicht an. Anzumerken ist hier, dass dadurch auch der Pumpenenergiebedarf steigt, da die Pumpe stets auf höchster Stufe betrieben wird. Eine Untersuchung des Hilfsenergiebedarfs und der Arbeitszahlen erfolgt in Kapitel 6.

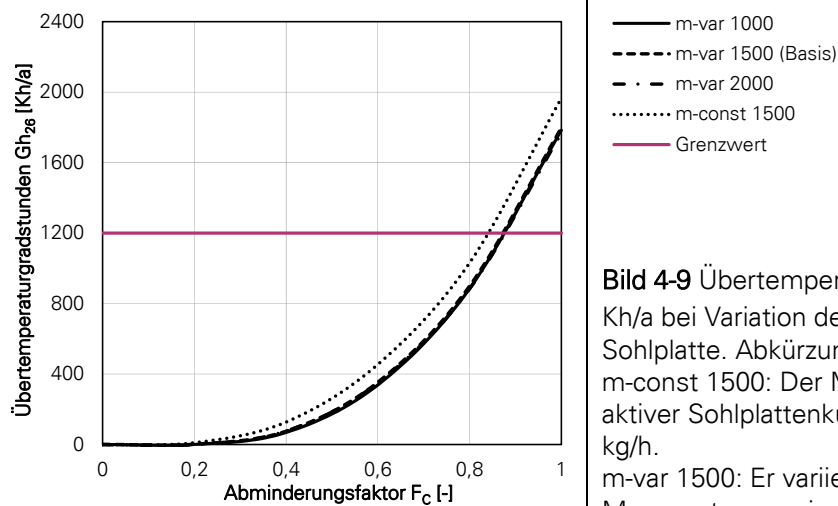


Bild 4-9 Übertemperaturgradstunden Gh_{26} in Kh/a bei Variation des Massenstroms in der Sohlplatte. Abkürzungen:
 m-const 1500: Der Massenstrom beträgt bei aktiver Sohlplattenkühlung konstant 1500 kg/h.
 m-var 1500: Er variiert je nach erforderlichem Massenstrom zwischen 4 Stufen.

Der Anstieg der Übertemperaturgradstunden bei konstantem Massenstrom ist darauf zurückzuführen, dass mehr Wärme in das Erdreich eingebracht wird und eine Ermüdung des Erdreichs etwas früher einsetzt. Bei variierendem Massenstrom wird hingegen bei geringem Kühlbedarf nur so viel Wasser transportiert wie erforderlich ist und somit erfolgt eine „Schonung“ des Erdreichs.

4.3.7 Erdreicheigenschaften

Einen hohen Einflussfaktor auf die Wirksamkeit der Sohlplattenkühlung stellt die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs dar. Es wurden vier Varianten untersucht, wobei neben der Wärmeleitfähigkeit auch Rohdichte und spez. Wärmekapazität variiert wurden, um damit verschiedene Gesteinsarten nach VDI 4640 Blatt 1 zu repräsentieren. In Tabelle 3-10 sind die untersuchten Erdreichparameter dokumentiert. Bild 4-10 zeigt die Übertemperaturgradstunden der vier Varianten.

Bei der Variante E05 mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit von nur $0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, was z. B. trockenen Lockergesteinen wie trockenem Ton/Schluff, Sand oder Kies entspricht, sinkt die Wirksamkeit der Kühlung, sodass für die Einhaltung der Anforderungen statt einem F_c -Wert von $0,85$ (Basisfall mit $\lambda = 1,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) ein Wert von maximal $0,7$ erforderlich ist. Liegen höhere Wärmeleitfähigkeiten vor steigt die Wirksamkeit, da die Wärme aus dem Gebäude gut an das Erdreich abgeführt werden kann. Bei den Wärmeleitfähigkeiten $2,5$ und $3,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ist sogar eine Einhaltung der Anforderungen ohne Sonnenschutz möglich. Eine zusätzliche Verbesserung der Wirksamkeit wäre bei Grundwasserströmungen erreichbar. Dies wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weitergehend untersucht.

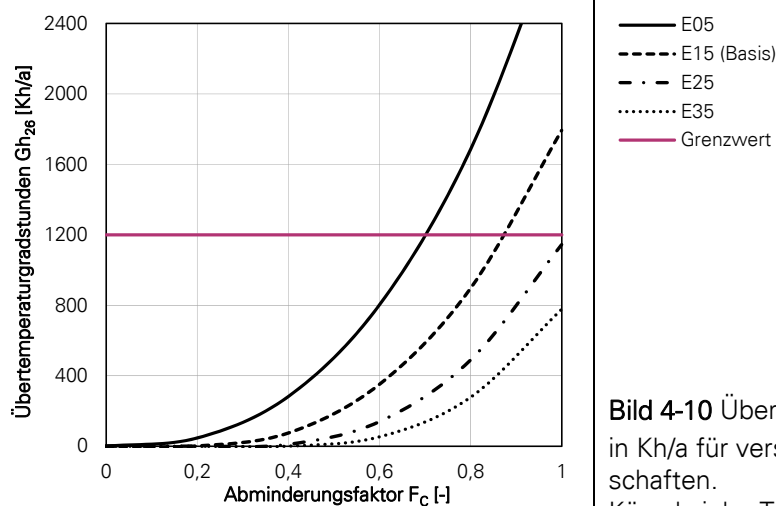


Bild 4-10 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für verschiedene Erdreichereigenschaften. Kürzel siehe Tabelle 3-10.

Die Differenzen unterstreichen die Relevanz über die Kenntnisse der vorliegenden Erdreichparameter. Liegen sehr trockene Gesteine in einem Baugrund vor, so ist zu überprüfen, ob eine Sohlplattenkühlung dennoch in Frage kommt oder ob ggf. andere Erdreichkühlssysteme eine wirkungsvollere Alternative darstellen.

4.3.8 Klimadaten

Ein weiterer zu untersuchender Zusammenhang war die Wirksamkeit des Kühlsystems für unterschiedliche Klimaregionen, insbesondere bei Jahren mit extrem warmen Sommern. Für die vorliegenden Berechnungen wurden die vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung zur Verfügung gestellten Testreferenzjahre (TRY) 2011 verwendet, wie bei Nachweisen des sommerlichen Wärmeschutzes nach [DIN 4108-2:2013-02] gefordert. Der TRY-Datensatz 2011 beinhaltet neben den Normaljahren (mittlere Witterungsverhältnisse) für jede der 15 Klimaregionen ein Testreferenzjahr für „extreme Sommer“ (sowie Winter).

Darüber hinaus existieren Datensätze, die eine Prognose für zukünftige Witterungsverhältnisse beinhalten („TRY 2035“). Die neuen ortsgenauen TRY-Datensätze aus dem Jahr 2017 lagen zu Beginn der Berechnungen noch nicht vor und wurden daher nicht untersucht.

In Bild 4-11 sind die Übertemperaturgradstunden für die drei Testreferenzjahre, welche die Sommerklimaregionen A, B und C repräsentieren, jeweils für mittlere Jahre und für Jahre mit extrem warmen Sommern zu sehen. Berechnungen für zukünftige Witterungsverhältnisse wurden im Rahmen einer zusätzlichen Betrachtung für die Klimaregion B durchgeführt. Dabei entsprechen die Klimadaten folgenden Klimaregionen und den jeweiligen Bezugswerten der operativen Innentemperatur $\theta_{b,op}$ nach [DIN 4108-2:2013-02]:

TRY 02, Rostock: Klimaregion A, $\theta_{b,op} = 25 \text{ °C}$

TRY 04, Potsdam: Klimaregion B, $\theta_{b,op} = 26 \text{ °C}$

TRY 12, Mannheim: Klimaregion C, $\theta_{b,op} = 27 \text{ °C}$

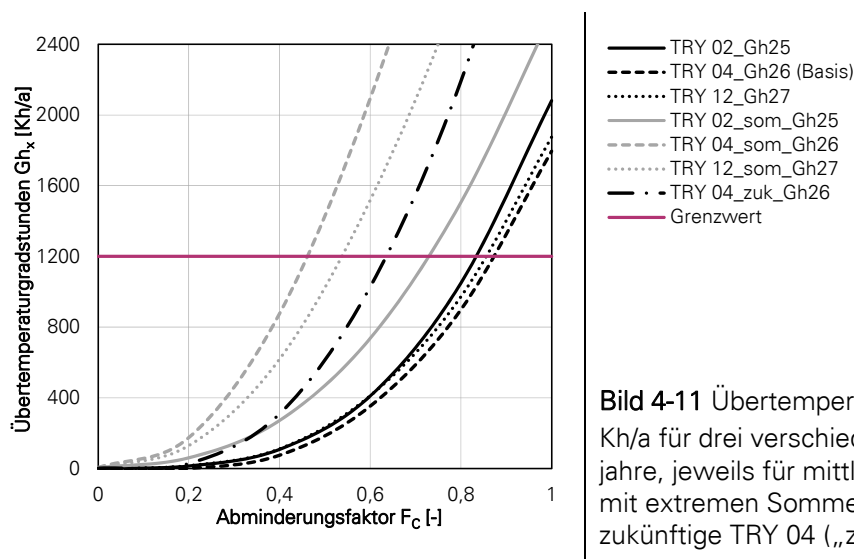


Bild 4-11 Übertemperaturgradstunden Gh_x in Kh/a für drei verschiedene Testreferenzjahre, jeweils für mittlere Jahre und Jahre mit extremen Sommern („som“) sowie das zukünftige TRY 04 („zuk“).

Die drei Klimaregionen weisen im Falle von Normaljahren einen ähnlichen Verlauf der Übertemperaturgradstunden auf. Dies würde sich bei einer Zugrundelegung desselben Bezugswerts der operativen Innentemperatur für alle drei Datensätze ändern. Da die Norm jedoch von einem adaptiven thermischen Komfortempfinden des Menschen ausgeht, ist der Bezugswert jeweils unterschiedlich und die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz damit ähnlich hoch.

Im Falle der extrem warmen Sommer (dargestellt in grau) variieren die Übertemperaturgradstunden stark. Insbesondere der TRY-Datensatz 04 (TRY 04_som_Gh26) führt zu einer maßgeblichen Steigerung des Überhitzungsrisikos im

Vergleich zum Normaljahr. Hier ist ein F_c -Wert von etwa 0,45 erforderlich, um die Anforderung einzuhalten. Die gegenüber den Normal-TRYs unterschiedliche Entwicklung der Kurven für die extrem warmen Sommer relativ zueinander ist in einer abweichenden Vorgehensweise bei der Erstellung der Extrem-TRY-Datensätze gegenüber den Normal-TRY-Datensätzen begründet. Für die Normal-TRYs wurden Segmente aus gemessenen Klimareihen aneinandergesetzt und darauf optimiert „monatliche und jahreszeitliche Verläufe sowie Variabilität und Auftretenshäufigkeit meteorologischer Parameter repräsentativ darzustellen“ [DWD 2014, 39]. Im Gegensatz dazu basieren die Extrem-TRYs auf realen Zeiträumen, die als charakteristisch für extreme Witterungsbedingungen in der jeweiligen Klimaregion gelten können. Dafür wurden gemessene Klimadaten aus den Jahren 1992 bis 2007 ausgewertet und ein extremes Sommer- (bzw. Winter-) Halbjahr anhand verschiedener Kriterien ausgewählt. Die Sommer-Extrem-TRYs der TRY-Regionen 04 und 12 basieren dabei auf Datensätzen aus dem Jahr 2006, während für das Extrem-TRY 02 Datensätze aus dem Jahr 1992 zugrunde gelegt wurden [DWD 2014, 41]. Die Vorgehensweise bei der Erstellung der Extrem-TRYs ist im TRY-Handbuch [DWD 2014, 39ff] ausführlich dokumentiert.

Der Fall „TRY_04_zuk“, welcher die zukünftigen Außentemperaturen widerspiegelt, führt ebenfalls zu einem deutlichen Anstieg der Übertemperaturgradstunden. Ein F_c -Wert von 0,6 führt hier zu einer Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes.

Zusätzlich zu dem bestehenden TRY-Datensatz ist es anhand eines mitgelieferten Tools unter Angabe der Einwohnerzahl möglich, den Klimadaten einen Stadteffekt aufzuprägen. Dabei kann zwischen drei Effekten gewählt werden:

Effekt 1: Stadtrand

Effekt 2: mittleres Stadtgebiet

Effekt 3: Eng bebaute Stadt

Dies wird für den TRY-Datensatz 04 Potsdam durchgeführt, wobei von einer gleich bleibenden Einwohnerzahl ausgegangen wird. Die Betrachtung eines Anstiegs der Einwohnerzahlen findet somit nicht statt. Die Resultate sind dem Basisfall (mittleres Jahr) in Bild 4-12 gegenübergestellt.

Anhand des Stadteffekts stellt sich eine leichte Steigerung der Übertemperaturgradstunden ein. Der Effekt „eng bebaute Stadt“ führt zu einem erforderlichen Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes von 0,8, gegenüber 0,85 im Basisfall. Bei Anwendung eines durchschnittlichen Sonnenschutzes in Kombination mit der Sohlplattenkühlung ist das Risiko einer Überhitzung hier immer noch gering.

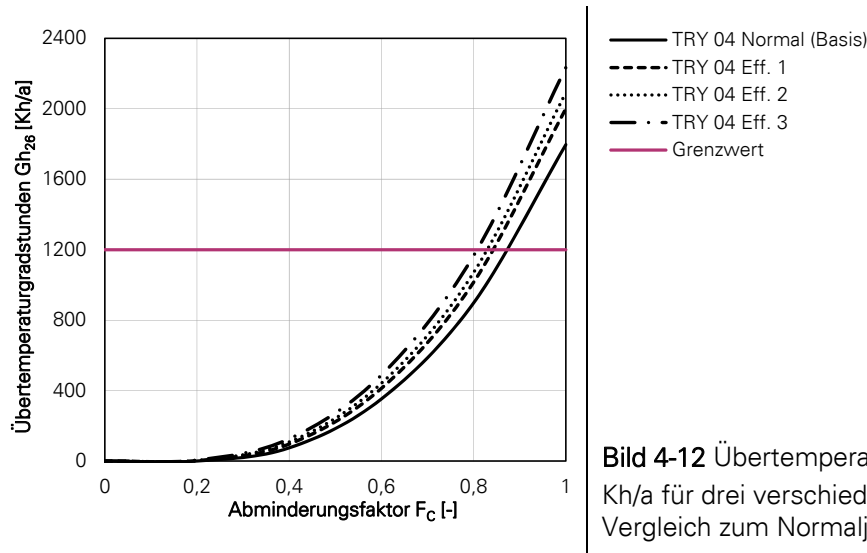


Bild 4-12 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für drei verschiedene Stadteffekte im Vergleich zum Normaljahr TRY 04.

Dennoch sollte der Einfluss der Bebauung nicht unterschätzt werden. Erdreichgekoppelten Systemen wird in der Literatur vielfach eine Abhängigkeit von der Bebauungsdichte zugeschrieben. Die hier vorgestellte Untersuchung zeigt nur den Einfluss veränderter Außentemperaturen auf das sommerliche Wärmeverhalten, nicht jedoch den Einfluss veränderter Erdreichtemperaturen, welche durch die Bebauungsdichte ebenfalls steigen können. Hierzu wären weiterführende Studien von Interesse.

4.3.9 Interne Wärmeeinträge

Um zu erfahren, ob durch die Sohlplattenkühlung auch erhöhte interne Wärmeeinträge kompensiert werden können, wurden zwei weitere Fälle untersucht. Abweichend von den nach [DIN 4108-2:2013-02] für Wohngebäude anzusetzenden $100 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ erfolgt eine Berechnung der Übertemperaturgradstunden bei 120 und $140 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

Die Ergebnisse in Bild 4-13 zeigen eine leichte Steigerung der Übertemperaturgradstunden, sodass bei internen Wärmeeinträgen von $140 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ein F_c -Wert von $0,8$ nicht mehr ausreichend wäre, um die Anforderungen einzuhalten. Bei Vorliegen eines innenliegenden Sonnenschutzes mit einem F_c -Wert von $0,65$ bis $0,75$ wäre jedoch ein Unterschreiten des Grenzwertes problemlos möglich.

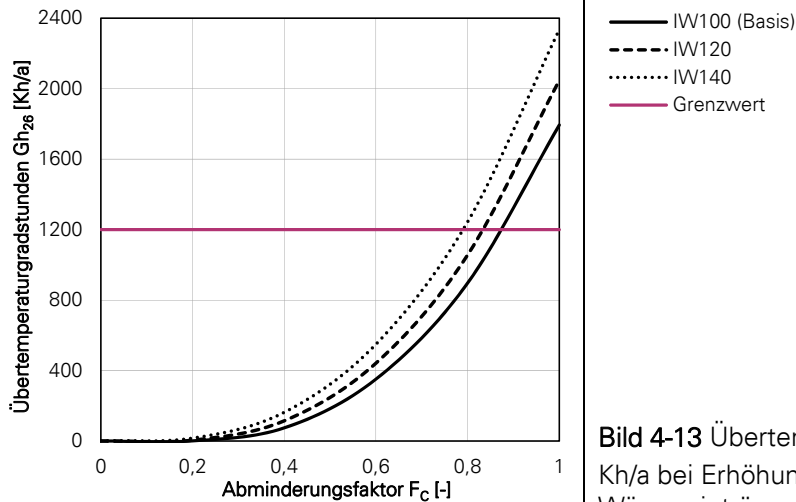


Bild 4-13 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Erhöhung der internen Wärmeeinträge.

4.3.10 Rohrlagen und -eigenschaften

Die folgenden Simulationsergebnisse zeigen Variationen der Rohrdurchmesser, Rohrabstände sowie der Rohrlage in den Geschossdecken und unter der Sohlplatte. Eine Veränderung der Rohrabstände der Bauteilaktivierung führt nur zu geringfügigen Unterschieden (vgl. Bild 4-14). Die besten Ergebnisse werden bei einem Rohrabstand von 12 cm erzielt. Rohrabstände von 15 und 20 cm erzeugen nahezu gleich hohe Übertemperaturgradstunden, wie die kaum zu unterscheidenden Verläufe in der Grafik erkennen lassen. Ein Rohrabstand von 18 cm führt im vorliegenden Fall zu den höchsten Übertemperaturgradstunden, jedoch sind die Differenzen verschwindend gering, sodass es schwer fällt konkrete Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen abzuleiten.

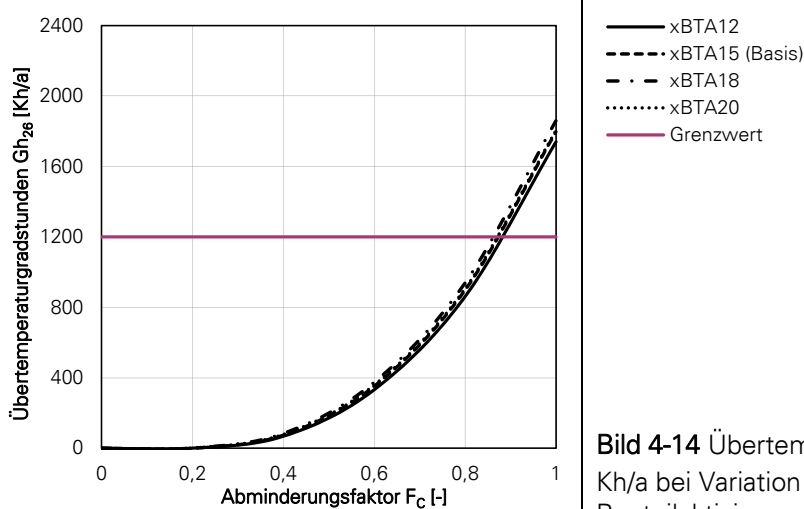


Bild 4-14 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation des Rohrabstands der Bauteilaktivierung.

Bild 4-15 zeigt verschiedene Systeme der Bauteilaktivierung für zwei unterschiedliche Rohrdurchmesser in Höhe von 16 und 20 mm. Auch im Rahmen der Variation der Rohrdurchmesser sind nur geringfügige Veränderungen der Übertemperaturgradstunden zu beobachten.

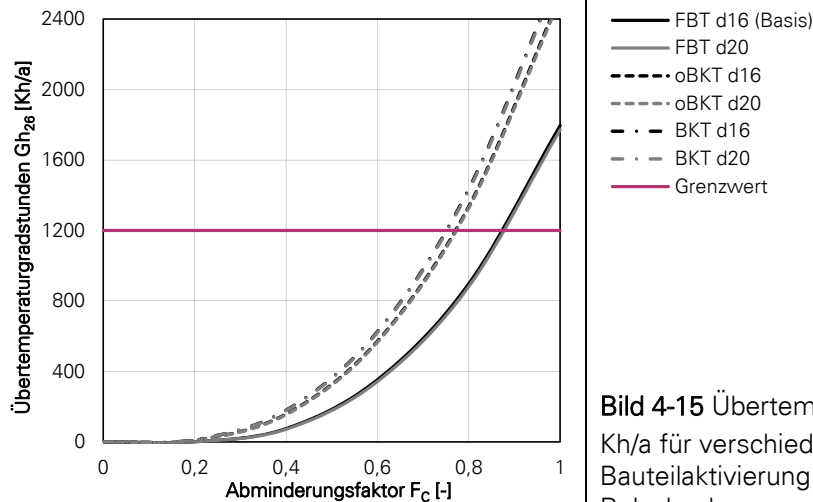


Bild 4-15 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für verschiedene Arten der Bauteilaktivierung und zwei verschiedene Rohrdurchmesser.

Größere Unterschiede ergeben sich bei Einsatz eines anderen Systems der Bauteilaktivierung. Hier wurde neben der im Basisfall verwendeten Fußboden-temperierung (FBT) eine Betonkernaktivierung (BKT) untersucht, bei der sich die Rohre mittig in den Betondecken befinden, sowie eine oberflächennahe Betonkernaktivierung (oBKT), bei der die Rohre oberflächennah in den Betondecken platziert sind. Die Fußbodentemperierung zeigt die niedrigsten Übertemperaturgradstunden, die Betonkernaktivierung die höchsten, wobei die oberflächennahe BKT nur geringfügig niedrigere Werte als die mittig liegende erzeugt. Vorteil der Fußbodentemperierung ist zudem, dass sie im Winter als Heizung dienen kann und keine getrennten Systeme für Heizen und Kühlen etabliert werden müssen.

Ursächlich für die niedrigeren Übertemperaturgradstunden bei der Fußbodentemperierung kann ihre geringere Trägheit sein. Die Wärme, welche durch die auf den Fußboden auftreffende Solarstrahlung entsteht, kann schneller über die im Estrich verlegten Rohre abgeführt werden. Damit wird die Aufheizung der Raumluft verringert. Im Falle der Betonkernaktivierung hingegen verteilt sich die entstehende Wärme zunächst im Raum. Die Wärmeabfuhr über die in der Decke befindlichen Rohre erfolgt verzögert. Eine Optimierung der Regelstrategie unter Berücksichtigung der höheren Trägheit könnte die Wirksamkeit der Betonkernaktivierung steigern. Häufig erfolgt im Falle einer Kühlung über eine Betonkernaktivierung in Kombination mit dem Erdreich ein durchgehender Betrieb. Alternativ ist ein Tag-Nacht-Betrieb möglich, bei dem die Betondecken während der Nacht mit

ausreichend Kälteenergie beladen werden, um dem Raum tagsüber Wärme zu entziehen [Pfafferot und Kalz 2007]. Dies wurde im Rahmen der Arbeit jedoch nicht näher untersucht.

Weiterhin wurden der Rohrdurchmesser und -abstand der Sohlplattenkühlung verändert. Die Ergebnisse sind Bild 4-16 zu entnehmen.

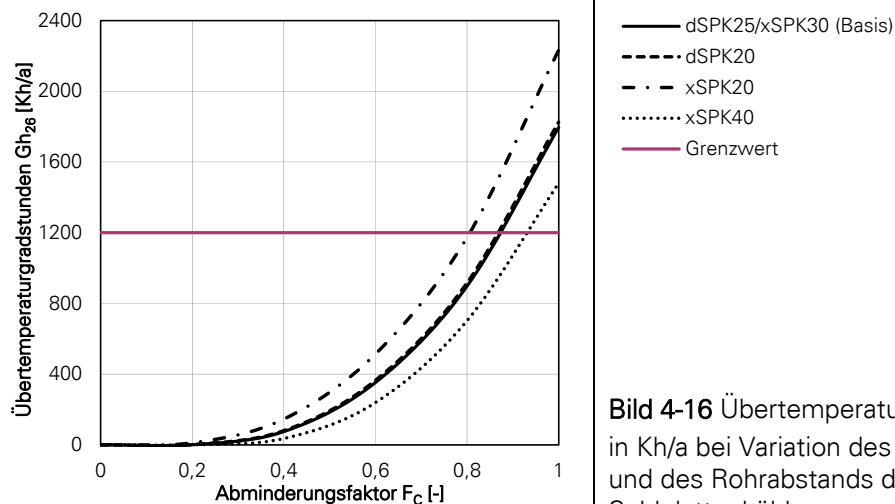


Bild 4-16 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation des Rohrdurchmessers und des Rohrabstands der Sohlplattenkühlung.

Ein geringerer Rohrdurchmesser von 20 mm führt hier zu minimalen Erhöhungen der Übertemperaturgradstunden. Dabei ist anzumerken, dass geringere Rohrdurchmesser mit höheren Druckverlusten verbunden sind und somit die Auslegung des Rohrnetzes zur Begrenzung des Energiebedarfs unterschiedlich ausfallen sollte.

Bei einer Verringerung des Rohrabstands auf 20 cm gegenüber 30 cm im Basisfall ist eine Erhöhung der Übertemperaturgradstunden zu beobachten und ein Rohrabstand von 40 cm führt zu einer Senkung, wie in Bild 4-16 zu sehen. Ursächlich ist, dass sich das Erdreich durch den erhöhten Abstand im Laufe des Jahres langsamer erwärmt und eine „thermische Ermüdung“ des Erdreichs später eintritt. Andererseits kann ein größerer Rohrabstand erhöhte Übertemperaturgradstunden mit sich bringen, da sich die Rohrleitungslänge und damit die Wärmeübertragung bei gleich bleibender Grundfläche verringern. Hier wären zusätzliche Berechnungen von Interesse, welche den Einfluss des Rohrabstands kombiniert mit einer Veränderung der Erdreieigenschaften darlegen und die Ableitung eines Optimums zulassen. Empfehlungen für einen wasserdurchströmten Erdwärmekollektor zur passiven Kühlung gemäß [Blümel et al. 2002] beinhalten einen Achsabstand von ca. 50 cm. Nach [E VDI 4640-2:2015-05] werden verschiedene Rohrabstände je nach vorliegendem Erdreich und Klimaregion für die Auslegung angegeben. Hierbei ist jedoch eine Nutzung als Erdwärmekollektor zur

Beheizung vorgesehen, womit unklar ist, ob diese Angaben auf eine Kühlfunktion übertragbar sind. Untersuchungen nach [Hirsch et al. 2016] ergeben bei niedrigen Rohrabständen höhere Systemjahresarbeitszahlen, wobei diese ebenfalls nur für eine Heizfunktion mit einer Wärmepumpe angegeben sind.

4.3.11 Zwischenfazit der Parameterstudie

Die Sohlplattenkühlung zeigt sich im Rahmen der Parameterstudie als effizientes System der passiven Kühlung. Die Parametervariationen konnten verschiedene Einflüsse wiedergeben und quantifizieren. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn zusätzlich zur Sohlplattenkühlung ein außenliegender Sonnenschutz sowie eine Tag- und Nachtlüftung zum Tragen kommt. In einigen Fällen, wie z. B. bei Vorliegen hoher Geschosshöhen, einer leichten Bauart oder ungünstigen Erdreichparametern mit niedriger Wärmeleitfähigkeit, sollte von einer Sohlplattenkühlung tendenziell abgesehen werden, insbesondere bei Fehlen eines außenliegenden Sonnenschutzes. Hier können ggf. andere passive Kühlsysteme sinnvoller sein. Auch sich verändernde Klimaverhältnisse mit einer Tendenz zu steigenden Hitzeperioden können bewirken, dass die Sohlplattenkühlung nicht ausreicht, um die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz einzuhalten.

5 Komfortbewertung

Das folgende Kapitel zeigt eine Bewertung des thermischen Komforts ausgewählter Fälle nach [DIN EN 15251:2012-12]. Ein Vergleich der Bewertungsmethoden und Anforderungen nach [DIN 4108-2:2013-02] gegenüber [DIN EN 15251:2012-12] erfolgt nur am Rande. Eine ausführliche Gegenüberstellung ist in [Schlitzberger 2014, 171ff] zu finden. Die hier vorgestellten Auswertungen sollen zum einen aufzeigen, ob die Sohlplattenkühlung das Potential hat, einen hohen thermischen Komfort zu erzielen und zum anderen ob die Kriterien des adaptiven Modells oder des PMV-Modells erreichbar sind. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, ist streng genommen das PMV-Modell heranzuziehen, da nach [DIN EN 15251:2012-12] Gebäude mit passiven Kühlsystemen als maschinell gekühlte Gebäude gelten. Hiernach wird die passive Kühlung auf eine Stufe mit der aktiven Kühlung gestellt. Ob die Sohlplattenkühlung diesem erhöhten Anspruch gerecht wird oder ob lediglich die Grenzen des adaptiven Modells unterschritten werden können, sollen die folgenden Auswertungen zeigen.

In den meisten Fällen der Parametervariation führte ein Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes F_c von 0,8 (üblicherweise innenliegender Sonnenschutz) gerade noch zu einem Einhalten des Anforderungskriteriums nach [DIN 4108-2:2013-02]. Um zu ermitteln, ob hierbei auch ein hoher Komfort zu erwarten ist, wird dieser durchgängig unter Anwendung eines F_c -Werts von 0,8 bewertet. Die Räume des Mehrfamilienhauses Schlafzimmer, Bad und Flur weisen auch ohne die Sohlplattenkühlung sehr niedrige operative Innentemperaturen und in der Folge geringe Überschreitungshäufigkeiten der Komfortgrenzen auf (im Schlafzimmer beispielsweise 7 h/a bei Kategorie II, adaptives Modell). Auf eine grafische Dokumentation dieser Räume wird daher verzichtet. Wie auch bei der Parametervariation in Kapitel 4.3 beschränken sich die folgenden Auswertungen zum thermischen Komfort auf das Wohnzimmer im 1. Obergeschoss.

Die Komfortbewertung erfolgt durch eine Darstellung der Stundenwerte der operativen Innentemperaturen in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperaturen. Dabei sind die Komfortgrenzen der Kategorien I, II und III nach [DIN EN 15251:2012-12] sowohl für das PMV-Modell als auch für das adaptive Modell in den grafischen Abbildungen hinterlegt. Die jeweils farblich dargestellten Linien markieren die für das Gebäude geltenden Grenzwerte. Wie auch bei der Auswertung des sommerlichen Wärmeschutzes entsprechen die Randbedingungen der verschiedenen Fälle dem Basisfall mit Ausnahme des jeweils veränderten Parameters, welcher in den Bildbeschriftungen kenntlich gemacht ist. Um eine

konkrete quantitative Aussage zu den Überschreitungen der Komfortgrenzen treffen zu können, sind im rechten oberen Bereich der Abbildungen die Überschreitungshäufigkeiten des oberen Grenzwerts der Kategorie II in Stunden pro Jahr angegeben – jeweils für das PMV-Modell und das adaptive Modell. Kategorie II entspricht gemäß [DIN EN 15251:2012-12] der für Neubauten empfohlenen Kategorie und soll ein „normales Maß an Erwartungen“ repräsentieren. Der untere Grenzwert wird im Rahmen der Betrachtungen vernachlässigt.

Die empfohlenen Kriterien für die Überschreitungen der Grenzen der jeweiligen Kategorie sind in Tabelle 5-1 dokumentiert.

Tabelle 5-1 Empfohlene Kriterien für die Überschreitungen der Grenzen der jeweiligen Kategorie gemäß [DIN EN 15251:2012-12], Anhang G.

	Empfohlene Grenzwerte nach DIN EN 15251	
Zulässige Abweichung von den Grenzwerten der Kategorien in % der Nutzungszeit	3 %	5 %
Zulässige Abweichung von den Grenzwerten der Kategorien für die Wohnnutzung in [h/a]	263	438

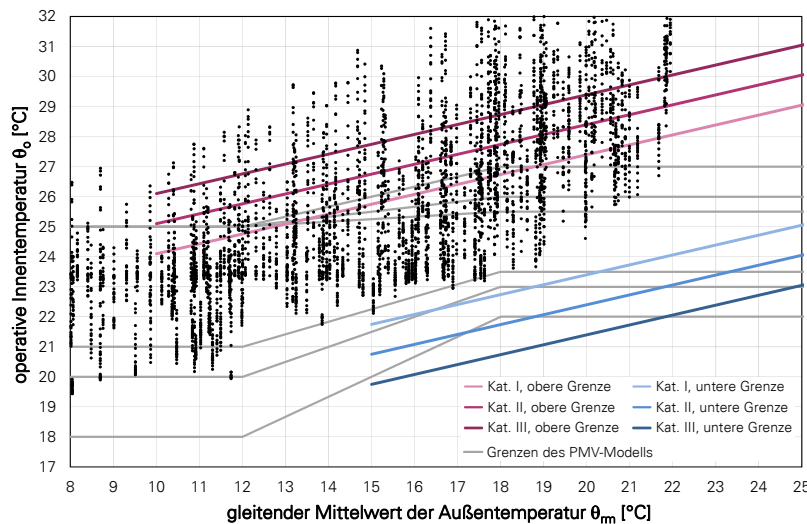
Bei Verwendung des 5 %-Kriteriums, bedeutet dies, dass die jeweiligen Grenzen der Kategorie I, II oder III an 5 % der Nutzungszeit überschritten werden dürfen. Dies sind im Falle der Wohnnutzung: $8760 \text{ h/a} \cdot 0,05 = 438 \text{ h/a}$. Von einer eindeutigen Zuweisung eines Grenzwertes mit Vorgabe, in welchen Fällen 3 % oder 5 % anzuwenden sind, wird in [DIN EN 15251:2012-12] abgesehen. In [Schlitzberger 2014, 181] wird für die Entwicklung eines neuen Kennwertverfahrens zur Bewertung des sommerlichen Komforts ein Grenzwert von 3 % der Nutzungszeit verwendet.

Zunächst erfolgt eine Dokumentation des Referenzfalls ohne Einsatz der Sohlplattenkühlung (Kapitel 5.1). Anschließend wird der thermische Komfort für den Basisfall ausgewiesen, gefolgt von ausgewählten Parametervariationen. Eine Gegenüberstellung der Überschreitungshäufigkeiten aller betrachteten Fälle schließt das Kapitel der Komfortbewertung ab.

5.1 Referenzfall ohne Kühlung

Der thermische Komfort für den Referenzfall ist in Bild 5-1 für das Wohnzimmer im OG ausgewiesen. Jeder Datenpunkt entspricht einem Stundenwert der operativen Raumtemperatur für das dritte Jahr der Simulationen. Aufgrund der fehlenden Kühlung gelten für den Referenzfall die Komfortgrenzen des adaptiven Modells,

diese sind in der Grafik für die Kategorien I bis III farblich hervorgehoben. Die rot dargestellten Linien bilden eine Begrenzung der Innentemperatur nach oben, die blauen eine Begrenzung nach unten.



Überschreitungshäufigkeiten Kategorie II:

(PMV: 2122 h/a)

adaptiv: 1301 h/a

Bild 5-1 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen.

Referenzfall, $F_c = 0,8$.

Die Grenzen der Kategorie II werden im Wohnzimmer an 1301 h/a überschritten und übersteigen damit das 3 %- sowie das 5 %-Kriterium deutlich, wie in Bild 5-1 dokumentiert. Bei fehlendem außenliegendem Sonnenschutz ist zur Komfortwahrung daher eine effektive Maßnahme zur Reduzierung der Innentemperaturen notwendig.

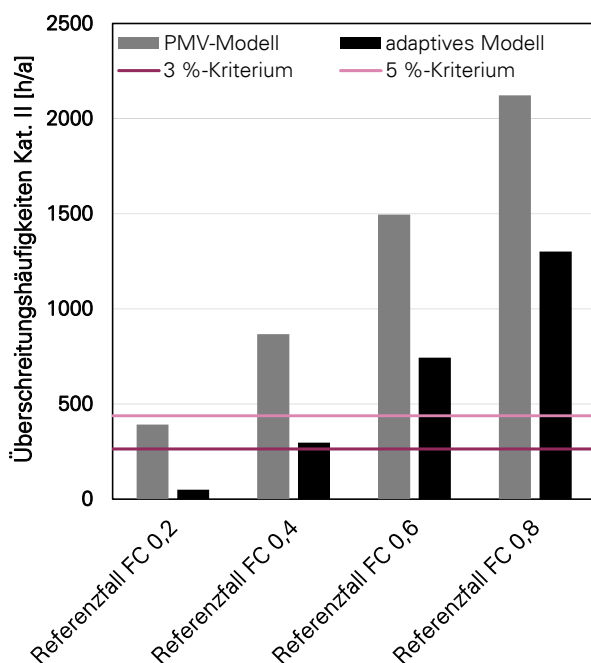


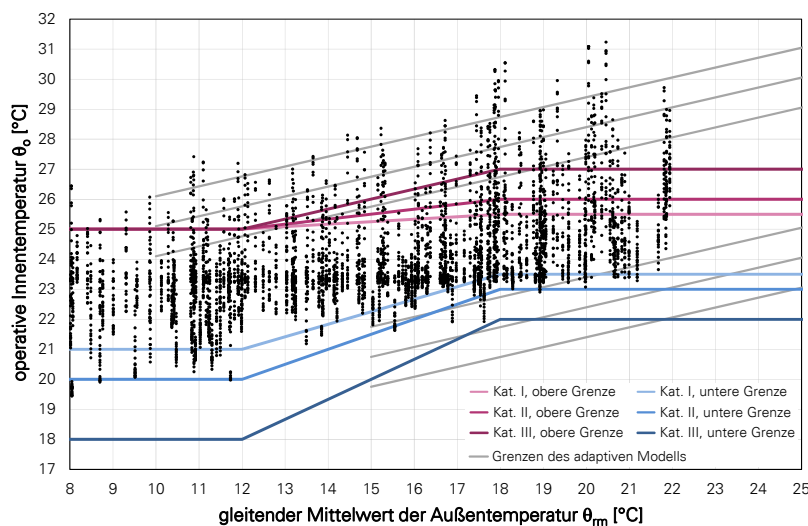
Bild 5-2 Überschreitungshäufigkeiten der Kategorie II bei Variation des Abminderungsfaktors des Sonnenschutzes F_c für den **Referenzfall**, jeweils für das adaptive Modell und das PMV-Modell (vollständigkeitshalber).

Bild 5-2 zeigt die Überschreitungshäufigkeiten bei einer Variation des Abminderungsfaktors, wobei die horizontalen Linien die Grenzwerte für das 3 %- und das 5 %-Kriterium angeben.

Eine Unterschreitung des 3 %-Kriteriums kann nur bei einem F_c -Wert von 0,2 erreicht werden, wobei ein F_c -Wert zwischen 0,2 und 0,35 vermutlich auch genügen würde.

5.2 Basisfall

Bild 5-3 zeigt den thermischen Komfort für den Basisfall, gemäß Definition nach Tabelle 3-12, bei einem Abminderungsfaktor von 0,8. Wird das PMV-Modell (so wie nach [DIN EN 15251:2012-12] vorgesehen) herangezogen, ist mit 660 h/a kein Einhalten der zulässigen Überschreitungen möglich – weder beim 3 %- noch beim 5 %-Kriterium. Bei Anwendung des adaptiven Modells kann das 3 %-Kriterium von 263 h/a punktgenau eingehalten werden.



Überschreitungshäufigkeiten Kategorie II:

PMV: 660 h/a

adaptiv: 263 h/a

Bild 5-3 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen. **Basisfall**, $F_c = 0,8$.

Die Dokumentation des Basisfalls erfolgt analog zum Referenzfall zusätzlich für eine Variation des Abminderungsfaktors F_c , wie in Bild 5-4 zu sehen.

Bei einem F_c -Wert von 0,6 sinken die Überschreitungshäufigkeiten für das PMV-Modell auf 309 h/a, womit das 5 %-Kriterium von maximal 438 h/a erfüllt wird. Die Einrichtung eines effektiveren Sonnenschutzes unterstützt somit die Realisierung eines hohen thermischen Komforts. Bei einem F_c -Wert von 0,4 oder 0,2 ist eine Einhaltung des 3 %-Kriteriums auch beim PMV-Modell problemlos möglich. Insgesamt führt die Sohlplattenkühlung im Vergleich zum Referenzfall zu deutlich niedrigeren operativen Innentemperaturen.

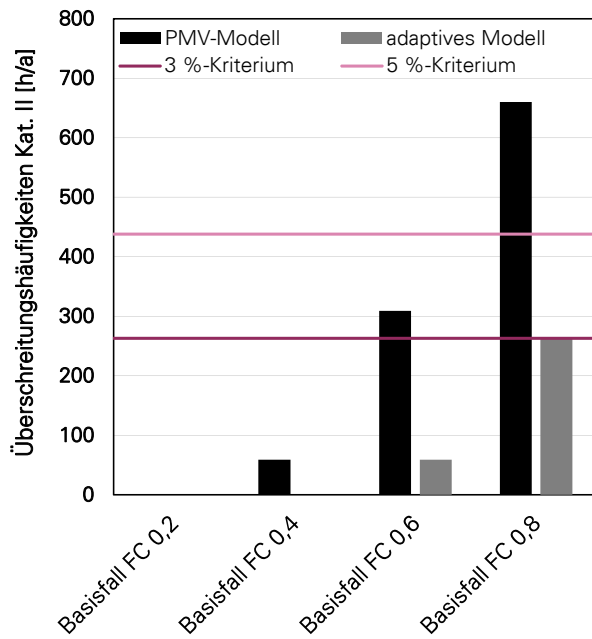


Bild 5-4 Überschreitungshäufigkeiten der Kategorie II bei Variation des Abminderungsfaktors des Sonnenschutzes F_c für den **Basisfall**, jeweils für das PMV-Modell und das adaptive Modell, Wohnzimmer OG.

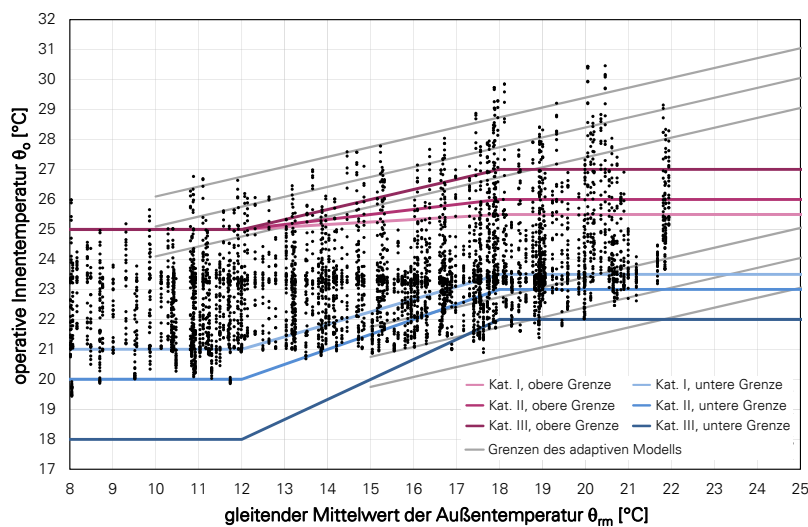
5.3 Ausgewählte Parametervariationen

Das folgende Kapitel zeigt den thermischen Komfort für verschiedene Parametervariationen bei vorliegender Sohlplattenkühlung. Alle Auswertungen entsprechen hinsichtlich ihrer Randbedingungen dem Basisfall mit einem F_c -Wert von 0,8 und Variation eines einzelnen Parameters, welcher jeweils kenntlich gemacht wird. Eine Dokumentation erfolgt ausschließlich für das Wohnzimmer.

5.3.1 Nachtlüftung

Die Einrichtung einer erhöhten Nachtlüftung zusätzlich zur vorhandenen erhöhten Taglüftung senkt die Überschreitungshäufigkeiten beim PMV-Modell von zuvor 660 auf 455 h/a, wie in Bild 5-5 angegeben. Damit kann eine Einhaltung der Grenzwerte noch nicht erreicht werden. Ist eine hohe Nachtlüftung möglich (Bild 5-6), so liegen die Überschreitungen bei nur 391 h/a und somit unterhalb des 5 %-Kriteriums.

Unter Anwendung des adaptiven Modells, ist eine Unterschreitung des 3 %-Kriteriums bei einer erhöhten oder hohen Nachtlüftung in Kombination mit der Sohlplattenkühlung gegeben.

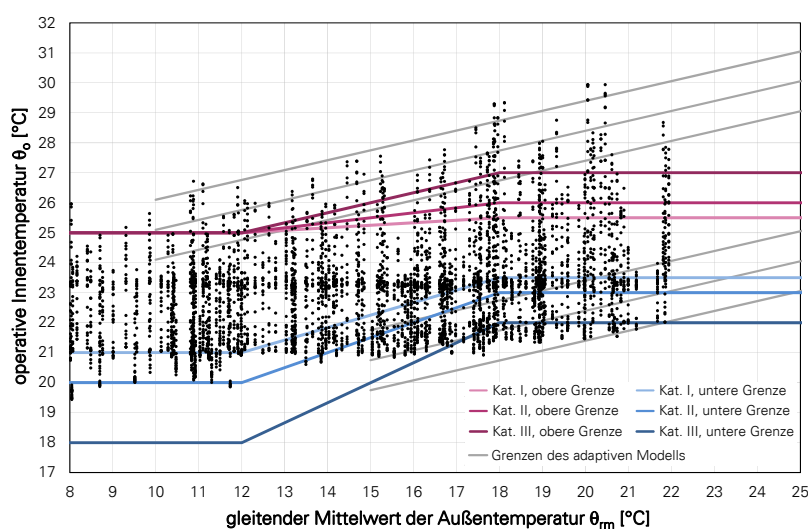


Überschreitungshäufigkeiten Kategorie II:

PMV: 455 h/a

adaptiv: 150 h/a

Bild 5-5 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen bei **erhöhter Nachtlüftung (NL2)**, $F_c = 0,8$.



Überschreitungshäufigkeiten Kategorie II:

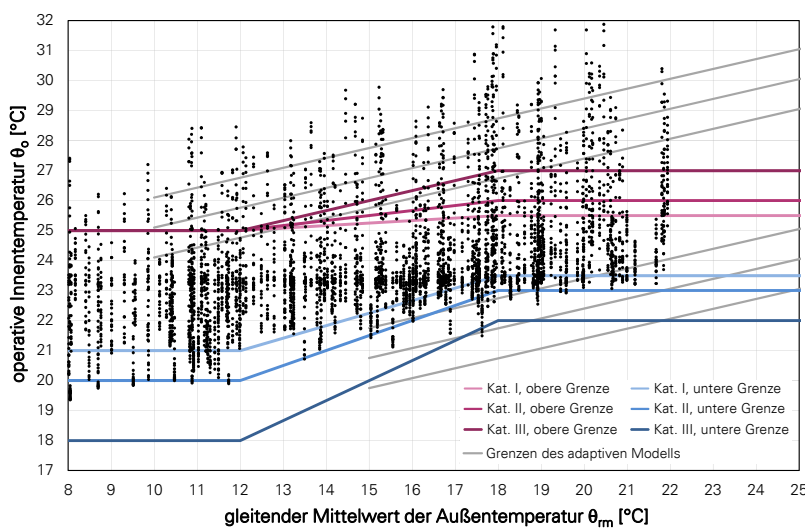
PMV: 391 h/a

adaptiv: 101 h/a

Bild 5-6 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen bei **hoher Nachtlüftung (NL5)**, $F_c = 0,8$.

5.3.2 Bauart

Eine leichte Bauart (Bild 5-7) führt zu einer Verschlechterung des thermischen Komforts. Hier liegt selbst unter Anwendung des adaptiven Modells keine Einhaltung der Grenzwerte nach [DIN EN 15251:2012-12] vor. Die schwere Bauart hingegen führt zu einer deutlichen Verringerung der Überschreitungshäufigkeiten, auch ist eine Senkung der maximalen operativen Innentemperaturen in der Grafik (Bild 5-8) sichtbar. Mit Überschreitungen von 572 h/a führt jedoch auch die schwere Bauart nicht zu einer Einhaltung der Grenzen bei Anwendung des PMV-Modells.

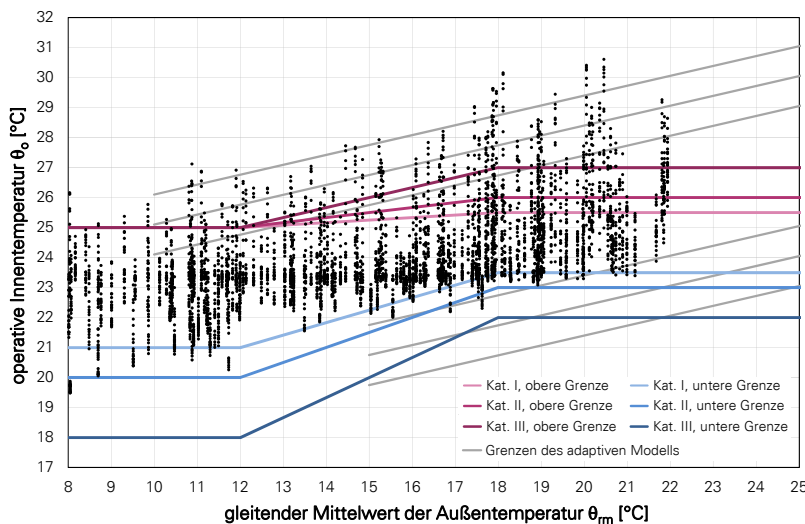


Überschreitungshäufigkeiten Kategorie II:

PMV: 822 h/a

adaptiv: 439 h/a

Bild 5-7 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen bei **leichter Bauart**, $F_c = 0,8$.



Überschreitungshäufigkeiten Kategorie II:

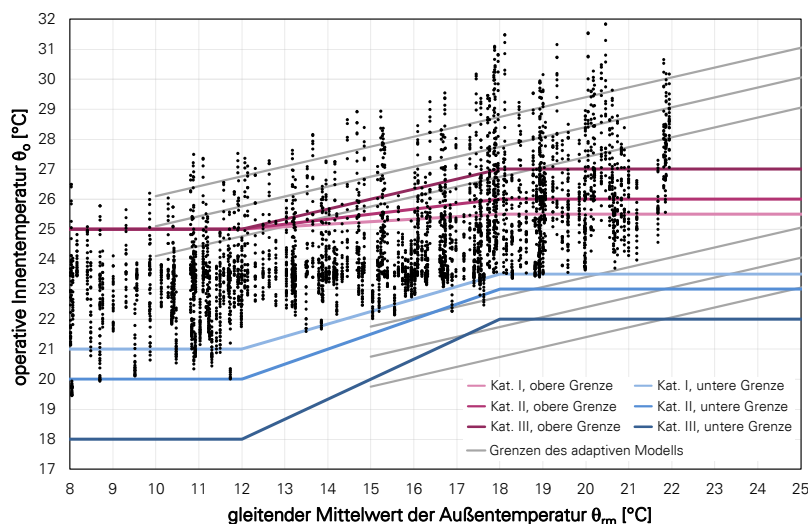
PMV: 572 h/a

adaptiv: 192 h/a

Bild 5-8 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen bei **schwerer Bauart**, $F_c = 0,8$.

5.3.3 Erdreichereigenschaften

Wie bereits bei der Auswertung der Übertemperaturgradstunden deutlich wurde, beeinflussen die Eigenschaften des Erdreichs die Effizienz der Sohlplattenkühlung und somit die thermische Behaglichkeit im Gebäude deutlich, wie Bild 5-9, Bild 5-10 und Bild 5-11 veranschaulichen. Liegt eine niedrige Wärmeleitfähigkeit von nur $0,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ vor, so sollte von einer Sohlplattenkühlung abgesehen werden, da ein dauerhafter Nutzen unwahrscheinlich ist. Die Überschreitungshäufigkeiten nach dem PMV-Modell liegen bei über 1000 h/a. Im Gegensatz dazu sinken sie bei einer Wärmeleitfähigkeit von $2,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ auf 461 h/a und bei einer hohen Wärmeleitfähigkeit von $3,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ auf 337 h/a, womit das 5 %-Kriterium eingehalten werden kann. Die operative Innentemperatur liegt bei Variante E35 maximal bei ca. $29,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

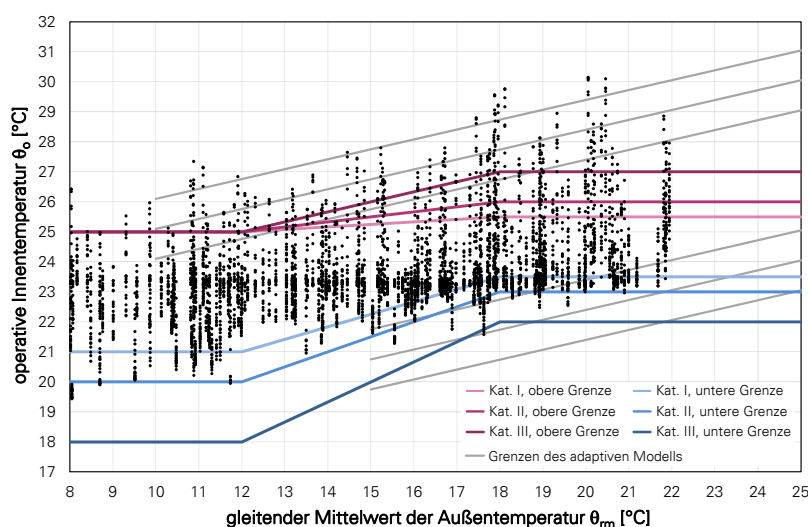


Überschreitungshäufigkeiten Kategorie II:

PMV: 1006 h/a

adaptiv: 444 h/a

Bild 5-9 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen, **Variante E05**, $F_c = 0,8$.

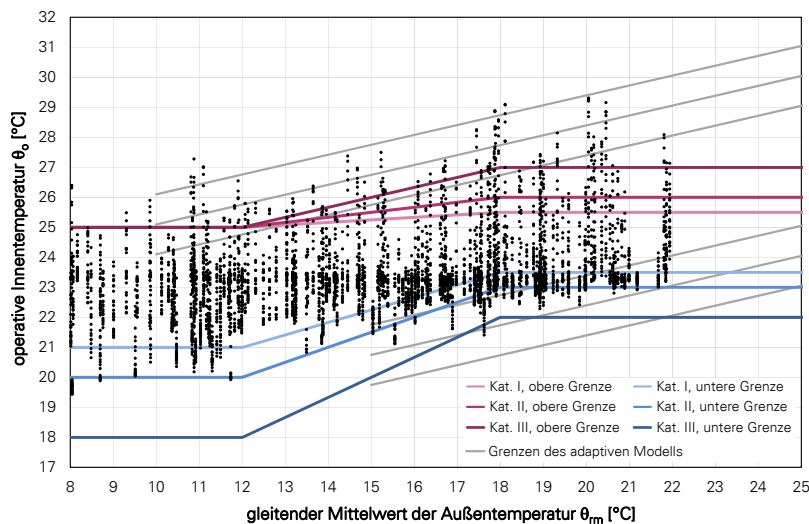


Überschreitungshäufigkeiten Kategorie II:

PMV: 461 h/a

adaptiv: 131 h/a

Bild 5-10 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen, **Variante E25**, $F_c = 0,8$.



Überschreitungshäufigkeiten Kategorie II:

PMV: 337 h/a

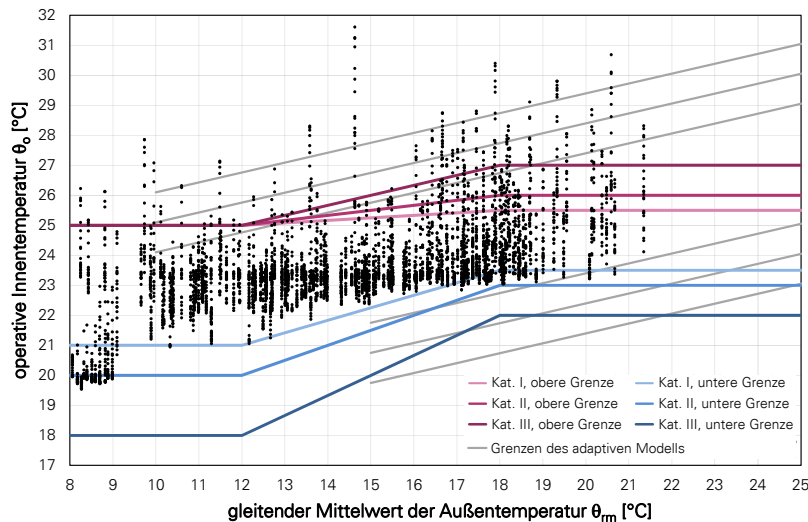
adaptiv: 73 h/a

Bild 5-11 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen, Variante E35, $F_c = 0,8$.

5.3.4 Klimadaten

Im Folgenden ist die Komfortbewertung für die zwei Klimaregionen A (TRY 02) und C (TRY 12) gezeigt. Auffällig ist hierbei, dass die Komfortbewertung von der Bewertung nach [DIN 4108-2:2013-02] abweicht. Während die Auswertung der Übertemperaturgradstunden zu einem ähnlichen Anforderungsniveau der Klimaregionen A, B und C führt, ergeben sich nach [DIN EN 15251:2012-12] für Klimaregion C tendenziell höhere Überschreitungshäufigkeiten als für die Klimaregion A. Diese Beobachtung entspricht Untersuchungen in [Schlitzberger 2014, 172ff] und ist zu erwarten, da nach [DIN 4108-2:2013-02] je nach Klimaregion unterschiedliche feste Bezugswerte für die Berechnung der Übertemperaturgradstunden verwendet werden. Nach [DIN EN 15251:2012-12] hingegen wird bei den Grenzwerten nicht nach Klimaregion unterschieden, stattdessen steigt der jeweilige Grenzwert der Kategorie mit steigendem gleitenden Mittelwert der Außentemperatur, wodurch eine Berücksichtigung des Klimas indirekt vorgenommen wird.

Bild 5-12 zeigt die Komfortbewertung für Klimaregion A. Hier ist mit 404 h/a bei Anwendung des PMV-Modells eine Einhaltung des 5 %-Kriteriums möglich. Im Gegensatz dazu sind bei Klimaregion C (Bild 5-13) 920 h/a zu verzeichnen, womit die empfohlenen Grenzwerte überschritten werden. Nur nach dem adaptiven Modell würde eine Einhaltung des 5 %-Kriteriums gegeben sein.

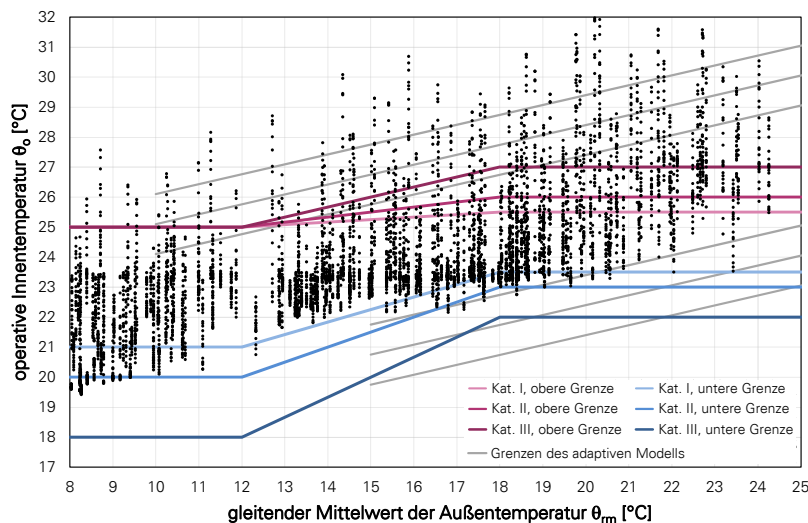


Überschreitungshäufigkeiten Kategorie II:

PMV: 404 h/a

adaptiv: 125 h/a

Bild 5-12 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen bei Klimaregion A (TRY 02), $F_c = 0,8$.



Überschreitungshäufigkeiten Kategorie II:

PMV: 920 h/a

adaptiv: 377 h/a

Bild 5-13 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen bei Klimaregion C (TRY 12), $F_c = 0,8$.

5.4 Gegenüberstellung ausgewählter Fälle

In diesem Kapitel erfolgt eine Gegenüberstellung der zuvor beschriebenen Fälle. Zusätzlich werden einige weitere Fälle dargestellt: Vorliegen einer Geschosshöhe von 6 (GZ6), normale (BKT) und oberflächennahe Betonkernaktivierung (oBKT) sowie extreme Sommer der drei Klimaregionen (TRY02_som, TRY04_som, TRY12_som). Auf eine grafische Abbildung dieser Fälle entsprechend der vorherigen Kapitel wird verzichtet.

Bild 5-14 zeigt die Überschreitungshäufigkeiten der oberen Grenze der Kategorie II für alle betrachteten Fälle jeweils für das PMV-Modell (schwarz) und das adaptive Modell (grau). Daneben sind die zulässigen Überschreitungen für das 3 %- und das 5 %-Kriterium kenntlich gemacht.

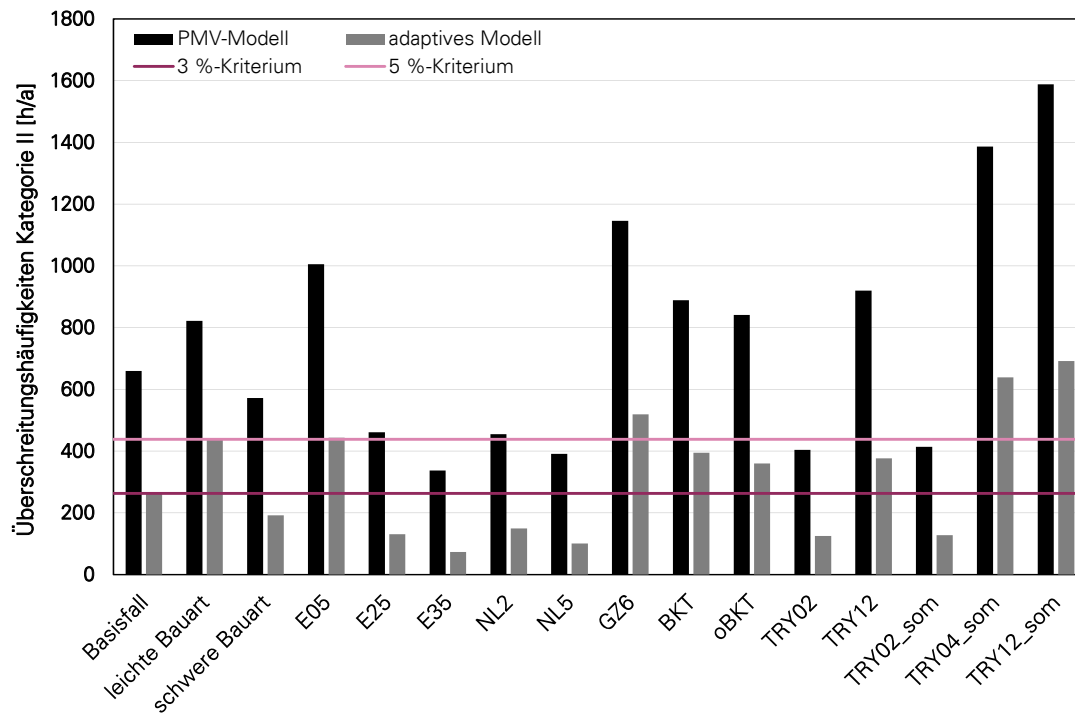


Bild 5-14 Gegenüberstellung der Überschreitungshäufigkeiten der oberen Grenze der Kategorie II für die ausgewählten Parametervariationen im Vergleich zum Basisfall (mittlere Bauart, E15, oNL, GZ3, FBT, TRY 04) bei einem F_c -Wert von 0,8.

Im Folgenden erfolgt eine Bewertung der Überschreitungshäufigkeiten für das adaptive Modell und das PMV-Modell. Anschließend werden die Komfortmodelle und -kriterien hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die Sohlplattenkühlung untersucht.

Auffällig ist, dass eine Einhaltung der Grenzwerte beim PMV-Modell unter den vorliegenden Randbedingungen nur schwer erzielt werden kann. Das 3 %-Kriterium wird in keiner der vorliegenden Variationen erfüllt. Das 5 %-Kriterium kann durch sehr gute Erdreichseigenschaften (E35), durch eine hohe Nachtlüftung sowie bei Vorliegen der Klimaregion A (TRY 02) erreicht werden, auch im Falle eines extrem warmen Sommers (TRY02_som) ist das Kriterium bei Klimaregion A noch einzuhalten. Für TRY 04 und TRY 12 hingegen sind im Falle der extremen Sommer sehr hohe Überschreitungshäufigkeiten zu verzeichnen, sodass hier weitere Maßnahmen für einen sommerlichen Wärmeschutz unbedingt vorzusehen sind. Zwei Fälle, die ebenfalls zu einer deutlichen Erhöhung der Überschreitungen führen sind die Varianten E05 (Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs 0,5 W/(m·K)) und GZ6 (Geschosszahl 6). Hier ist der Nutzen der Sohlplattenkühlung gering, sodass alternative Systeme in Betracht gezogen werden sollten.

Die Komfortbewertung zur Betonkernaktivierung kann analog zur Auswertung nach [DIN 4108-2:2013-02] erfolgen. Auch hier ist eine Erhöhung der Überschreitungshäufigkeiten zu verzeichnen, sodass die Fußbodentemperierung als wärmeübertragendes System gegenüber der Betonkernaktivierung effektiver erscheint.

Um einen fehlenden außenliegenden Sonnenschutz, eine fehlende Nachtlüftung und ein Erdreich mittlerer Wärmeleiteigenschaften soweit zu kompensieren, dass eine hohe thermische Behaglichkeit nach dem PMV-Modell erzielbar ist, reicht die Sohlplattenkühlung nicht aus. Sie ist jedoch in der Lage in Kombination mit weiteren Maßnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes, wie beispielsweise einem außenliegenden Sonnenschutz oder einer Nachtlüftung, eine Einhaltung des 5 %-Kriteriums nach dem PMV-Modell zu realisieren. Insbesondere um auch bei zukünftig häufiger auftretenden extremen Temperaturen im Sommer Komfortkriterien einzuhalten und um mindestens das 5 %-Kriterium unter Anwendung des PMV-Modells nicht zu überschreiten, ist eine Kombination der Sohlplattenkühlung mit weiteren Maßnahmen anzuraten.

Hinsichtlich der Bewertungsverfahren zeigt sich, dass das PMV-Modell für die Sohlplattenkühlung anwendbar ist. Hierbei stellt das Maximum von 5 % der Nutzungszeit ein adäquates Kriterium dar, welches bei einer Kombination des Kühlsystems mit anderen Maßnahmen bzw. bei Vorliegen guter Umgebungsbedingungen (hohe Nachtlüftung/schwere Bauart/gute Erdreischeigenschaften/mäßig hohe Außentemperaturen...) auch mit einem innenliegenden Sonnenschutz einzuhalten ist. Das 3 %-Kriterium hingegen stellt sehr hohe Anforderungen an das Gebäude, hier kann kaum eine Einhaltung erreicht werden. Das adaptive Modell auf der anderen Seite stellt relativ geringe Anforderungen an den thermischen Komfort und sollte, falls angewendet, nur mit dem 3 %-Kriterium kombiniert werden. Wird das 5 %-Kriterium zugrunde gelegt, sind zeitweise sehr hohe Innentemperaturen feststellbar. Beispielsweise bei genauerer Betrachtung des Falls der leichten Bauart, der mit 439 h/a nur sehr knapp die 5 %-Grenze überschreitet, oder des Falls der Klimaregion C, der die 5 %-Grenze einhält, ist festzustellen, dass zeitweise Innentemperaturen von fast 33 °C vorliegen. Um die thermische Behaglichkeit zu beurteilen, ist dieses Kriterium somit zu schwach.

6 Hilfsenergiebedarf und Jahresarbeitszahlen

Für die Bewertung der Energieeffizienz ist eine Berechnung des Hilfsenergiebedarfs erforderlich. Dieser kann anhand der zuvor bestimmten elektrischen Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe und der aus der Simulation resultierenden Laufzeit bestimmt werden. Der Energiebedarf der Pumpe ergibt sich durch Multiplikation von Leistung und Laufzeit. Der Pumpenbetrieb erfolgt in vier Stufen, wie in Kapitel 3.5.5 dokumentiert. Daher muss bei der Errechnung des Energiebedarfs neben der Laufzeit in der jeweiligen Stufe die dazugehörige Leistung Berücksichtigung finden.

Neben der elektrischen Energie für die Umwälzung des Wassers ist für eine Angabe der Arbeitszahl die Wärmeaufnahme des Erdreichs im Rahmen der Simulation zu ermitteln. Da der Type 710, mit dem die Sohlplattenkühlung abgebildet wird, einen Ausgabeparameter enthält, der die Wärmeabgabe bzw. -aufnahme angibt, ist eine Ermittlung der gesamten Wärmeaufnahme des Erdreichs durch Aufsummierung der stündlichen Werte möglich.

Mit Kenntnis dieser Daten kann die Jahresarbeitszahl (JAZ), als Indikator für die Effizienz der Sohlplattenkühlung, nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$JAZ = \frac{\text{Wärmeaufnahme Erdreich [kWh}_{\text{therm}}\text{]}}{\text{elektr. Energiebedarf Pumpe [kWh}_{\text{el}}\text{]}} \quad (6-1)$$

Die Berechnung der Jahresarbeitszahl wird am Beispiel des Basisfalls einmalig vorgerechnet. Die Berechnungen beziehen sich auch hier auf das dritte Jahr der Berechnungen und wurden für einen Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes F_c von 0,8 durchgeführt. Für jede der vier Leistungsstufen der Pumpe wurden die Laufzeiten im Rahmen der Simulation ermittelt und der daraus resultierende Energiebedarf berechnet, wie in Tabelle 6-1 dokumentiert:

Tabelle 6-1 Berechnung des Energiebedarfs der Umwälzpumpe und der Jahresarbeitszahl für den Basisfall bei einem F_c -Wert von 0,8.

	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
Laufzeit [h]	1932,50	213,70	816,50	338,90
Leistung Pumpe [W]	41	30	21	13
Energiebedarf je Stufe [kWh/a]	79,23	6,41	17,15	4,41
Gesamtenergiebedarf [kWh/a]	107,20			
Wärmeaufnahme Erdreich [kWh/a]	3044,22			
Jahresarbeitszahl [-]	28,40			

Die angesetzte Pumpenleistung entspricht den Ausführungen in Kapitel 3.5.5. Die Summe der einzelnen Energiebedarfe ergibt den Gesamtenergiebedarf der Pumpe.

Dieser liegt bei 107 kWh im betrachteten dritten Jahr der Simulation. Durch Kenntnis der Wärmeaufnahme des Erdreichs wird schließlich die Jahresarbeitszahl nach Gleichung 6-1 berechnet. Dabei ergibt sich für den Basisfall eine Jahresarbeitszahl von 28,4. Zum Vergleich: Im Zentrum für Umweltbewusstes Bauen, in dem ebenfalls eine Sohlplattenkühlung installiert wurde, ergab sich im laufenden Betrieb eine Leistungszahl von 22,8 [Hauser et al. 2004, 117]. Andere erdreichgekoppelte freie Kühlsysteme weisen zum Teil ähnlich hohe Werte auf, jedoch schwanken die Angaben zwischen ca. 10 und 35 und sind daher für einen Vergleich schlecht heranzuziehen.

Die Energieeffizienz des Kühlsystems ist damit im vorliegenden Fall sehr hoch. Dieses Ergebnis ist nachvollziehbar, da lediglich für die Umwälzung des Wassers Energie benötigt wird. Die Veränderung einiger Parameter bewirkt deutliche Veränderungen der Jahresarbeitszahlen. So kann bei einem niedrigeren F_C -Wert von 0,2 eine Jahresarbeitszahl von 52 erreicht werden. In Bild 6-1 sind die Veränderungen der Jahresarbeitszahl und des Energiebedarfs bei einer Variation des F_C -Werts zu sehen.

Bei Vorliegen eines außenliegenden Sonnenschutzes mit einem F_C -Wert von 0,2 ist eine geringere Pumpenlaufzeit erforderlich. Dies bewirkt eine Verringerung des Energiebedarfs und damit gegenüber dem Fehlen eines Sonnenschutzes in etwa eine Verdopplung der Jahresarbeitszahl und damit eine deutlich gestiegene energetische Effizienz des Pumpeneinsatzes.

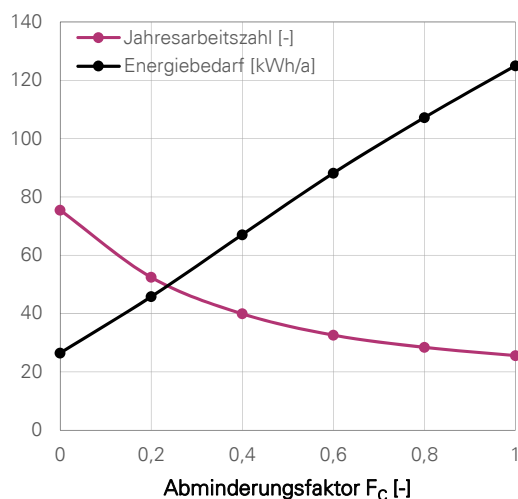


Bild 6-1 Jahresarbeitszahl [-] und Energiebedarf für die Umwälzpumpe [kWh/a] in Abhängigkeit vom Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes F_C für den Basisfall.

Die Energiebedarfe und Jahresarbeitszahlen wurden für ausgewählte Fälle berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Bild 6-2 dargestellt.

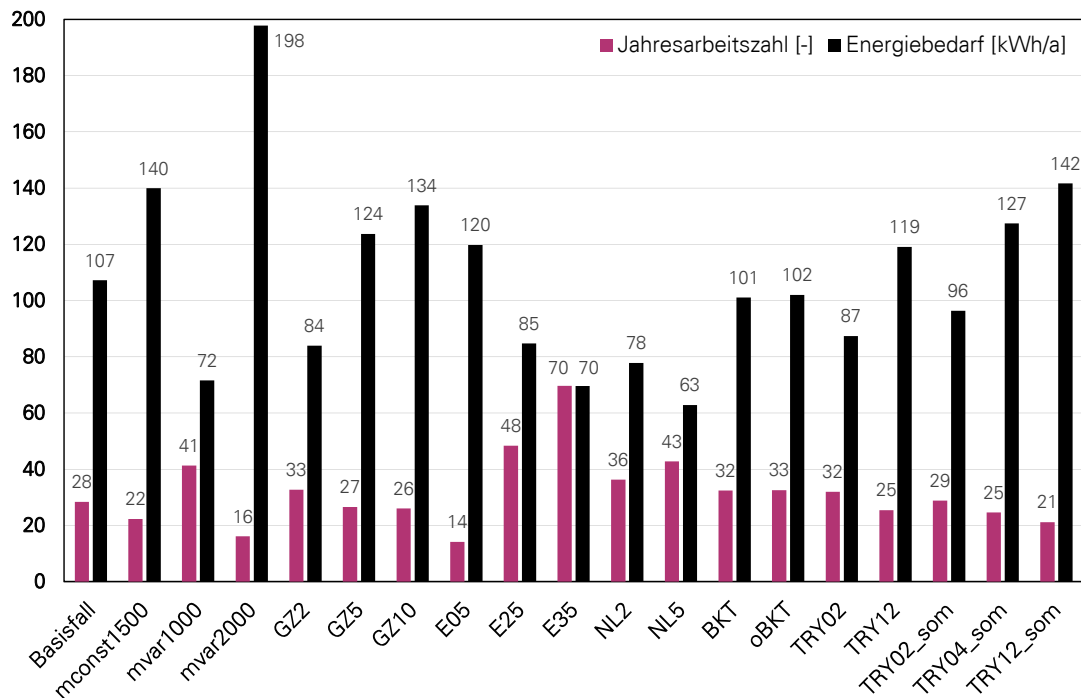


Bild 6-2 Gegenüberstellung der Energiebedarfe und Jahresarbeitszahlen für die ausgewählten Parametervariationen im Vergleich zum Basisfall (mittlere Bauart, E15, oNL, GZ3, FBT, TRY 04) bei einem F_c -Wert von 0,8.

In den meisten vorgestellten Fällen schwankt die Jahresarbeitszahl zwischen ca. 25 und 33 bei einem Energiebedarf von 85 bis 130 kWh pro Jahr. Insbesondere die Konfiguration des Massenstroms und die Pumpenauslegung beeinflussen die Effizienz der Sohlplattenkühlung deutlich. Nachteilig wirkt sich beispielsweise eine konstante Massenstromregelung aus (mconst1500). Hierbei wurde mit einem Massenstrom in der Sohlplatte von 1500 kg/h bei Aktivierung der Kühlung und einer unregelmäßigen Pumpe mit einer Leistung von 41 W gerechnet. Dadurch steigt der Energiebedarf auf 140 kWh/a und die JAZ sinkt auf 22. Mit einer Erhöhung des Massenstroms auf 2000 kg/h (mvar2000) geht eine gravierende Verschlechterung der Effizienz einher. In der vorliegenden Berechnung wurde ein Beibehalten der Rohrnetzauslegung angenommen. Infolgedessen führt eine Erhöhung des Massenstroms zu gesteigerten Druckverlusten. Dies bedingt eine erhöhte Pumpenleistung und damit einen höheren elektrischen Energiebedarf, welcher nicht durch die geringfügig bessere Wärmeaufnahme des Erdreichs kompensiert werden kann und somit eine deutlich niedrigere JAZ von 16 verursacht. Der Energiebedarf ist mit 198 kWh/a im Verhältnis zu den anderen Varianten relativ hoch. Die Pumpenauslegung für einen Massenstrom von 2000 kg/h ergab bei Vollast eine Leistung von 68 W, gegenüber 41 W im Basisfall (1500 kg/h). Bei Verringerung des Massenstroms auf 1000 kg/h (mvar1000) ist im vorliegenden Beispiel eine Leistungsaufnahme der Pumpe von 27 W bei Vollast ausreichend, sodass der Energiebedarf hier auf 72 kWh/a gesenkt werden kann. Dies führt zu einer sehr guten JAZ von 41.

Ebenfalls eine Beeinträchtigung der Effizienz ist bei Vorliegen ungünstiger Erdreichseigenschaften zu beobachten. Bei einer Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs von $0,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (E05) liegen der Energiebedarf bei ca. 120 kWh/a und die JAZ bei nur 14. Damit stellt der Fall „E05“ die schlechteste Variante hinsichtlich der Energieeffizienz dar.

Auch ungünstige Klimaverhältnisse bewirken eine Verschlechterung der Energieeffizienz. Im Falle des TRY-Datensatzes 12 mit einem extrem warmen Sommer (TRY12_som) liegt die Jahresarbeitszahl bei 21, der Energiebedarf bei ca. 140 kWh/a . Dies, verbunden mit erhöhten Übertemperaturgradstunden, kann den Nutzen der Sohlplattenkühlung deutlich mindern.

Sehr gute Ergebnisse können hingegen bei hohen Wärmeleitfähigkeiten im Erdreich sowie bei Einsatz einer Nachtlüftung festgestellt werden. Eine Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs von $2,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ erhöht die JAZ auf 48, bei $3,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ sogar auf 70. Dies ist auf eine stark erhöhte Wärmeaufnahme von 4100 kWh/a (E25) und 4850 kWh/a (E35) gegenüber 3044 kWh/a im Basisfall (E15) sowie einen damit einhergehenden sinkenden Energiebedarf aufgrund einer geringeren erforderlichen Pumpenlaufzeit zurückzuführen.

Auch eine Nachtlüftung führt zu spürbaren Verbesserungen der Energieeffizienz. Im Falle der erhöhten Nachtlüftung steigt die JAZ auf 36 und im Falle der hohen Nachtlüftung auf 43 an. Der Energiebedarf ist mit 63 kWh/a im Falle der hohen Nachtlüftung sogar niedriger als im Falle der hohen Erdreichwärmeleitfähigkeit (E35). Dennoch kann die Nachtlüftung nicht mit der hohen Wärmeaufnahme des Erdreichs „konkurrieren“.

Anzumerken ist weiterhin, dass die Entscheidung für oder gegen eine Sohlplattenkühlung nicht ohne eine Betrachtung der Übertemperaturgradstunden gefällt werden sollte. Während beispielsweise eine Geschosshöhe von 10 im betrachteten Fall zu einer guten Jahresarbeitszahl von 25 führt und einem akzeptablen Energiebedarf von 134 kWh/a , liegen die Übertemperaturgradstunden bei etwa 2900 Kh/a und damit weit über dem Grenzwert gemäß [DIN 4108-2:2013-02]. Insofern kann eine isolierte Betrachtung der Jahresarbeitszahl die falschen Schlüsse nach sich ziehen. In den meisten Fällen ist jedoch zu beobachten, dass geringe Übertemperaturgradstunden mit einer hohen Energieeffizienz einhergehen und umgekehrt hohe Übertemperaturgradstunden mit einer verschlechterten Energieeffizienz verbunden sind.

7 Gegenüberstellung Simulation und vereinfachtes Nachweisverfahren

Das Sonneneintragskennwerte-Verfahren, ausführlich beschrieben in Kapitel 2.1.1, stellt ein vereinfachtes Nachweisverfahren dar und kann alternativ zur thermisch-dynamischen Simulation angewendet werden. Mithilfe dieses Werkzeugs kann mit geringem Aufwand frühzeitig eine Einschätzung zur erforderlichen Qualität des Sonnenschutzes erfolgen, um eine Einhaltung des sommerlichen Mindestwärmeschutzes nach [DIN 4108-2:2013-02] zu erzielen und damit unzumutbar hohe Raumtemperaturen zu vermeiden.

Eine Anrechnung der passiven Kühlung ist auch beim vereinfachten Nachweisverfahren mithilfe eines Sonneneintragskennwerts möglich. Hierbei wird nur nach leichter, mittlerer und schwerer Bauart unterschieden, nicht nach Art des Systems. Der im Rahmen der letzten Novellierung im Jahre 2013 implementierte Sonneneintragskennwert beruht auf einer qualifizierten Einschätzung basierend auf vorangegangenen Untersuchungen. Da die Wirksamkeit der passiven Kühlsysteme jedoch nicht durch umfassende Berechnungen untersucht wurde, ist unklar, ob der Sonneneintragskennwert die tatsächlichen Potenziale widerspiegelt.

Um zu zeigen, ob eine tendenzielle Übereinstimmung des erforderlichen Sonnenschutzes bei Durchführung von Simulationen und bei Anwendung des vereinfachten Verfahrens für die Sohlplattenkühlung vorliegt, werden im Folgenden die Ergebnisse beider Verfahren für ausgewählte Parametervariationen gegenübergestellt. Ähnlich der Darstellung in Kapitel 4 erfolgt ein Auftragen der Übertemperaturgradstunden (rechte Ordinate) über dem Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes F_c , jedoch zusätzlich mit Auftragung der Über- bzw. Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts S_{zul} (linke Ordinate). Als Achsenbereich wurde ein Bereich von -0,10 bis 0,10 gewählt. Die Berechnungen mit dem vereinfachten Verfahren sind mit „_Sx“ kenntlich gemacht, die Simulationen mit „_Sim“. Da auch beim vereinfachten Verfahren die Räume Schlafzimmer, Bad und Flur zu geringen Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz führen, wird auf eine Dokumentation dieser Räume verzichtet. Die Auswertungen zeigen somit nur die Ergebnisse für das Wohnzimmer. Es ist anzumerken, dass beim vereinfachten Verfahren einige Parameter nicht variiert werden können. Während im Rahmen der Simulationen beispielsweise eine Veränderung der Erdschichteneigenschaften möglich ist, kann dieser Einfluss beim vereinfachten Verfahren nicht abgebildet werden.

Zunächst wird – analog zu den vorangegangenen Kapiteln – der Referenzfall ohne Kühlung dargestellt. Anschließend wird eine Auswahl von Fällen mit Anwendung der Sohlplattenkühlung dokumentiert.

7.1 Referenzfall ohne Kühlung

In Bild 7-1 ist der Referenzfall für verschiedene Konfigurationen der Nachtlüftung dokumentiert. Nach dem vereinfachten Verfahren liegt der erforderliche F_C -Wert beispielsweise für den Fall der erhöhten Nachtlüftung (NL2) bei ca. 0,25. Bei der Simulation hingegen liegt er bei ca. 0,5.

Da das vereinfachte Verfahren tendenziell zu einer strengeren Bewertung führt, um „auf der sicheren Seite zu liegen“ und so eine ausreichende Auslegung des Sonnenschutzes zu gewährleisten, ist ein niedrigerer F_C -Wert hier zu erwarten.

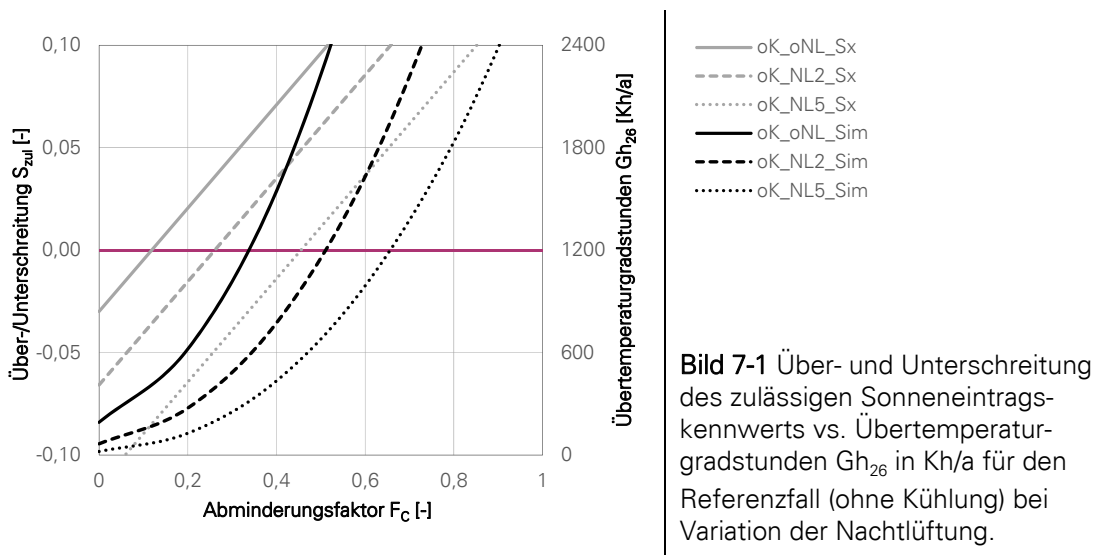


Bild 7-1 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden Gh_{26} in Kh/a für den Referenzfall (ohne Kühlung) bei Variation der Nachtlüftung.

7.2 Ausgewählte Parametervariationen

Die nachfolgenden Auswertungen in Bild 7-2 bis Bild 7-7 zeigen die Ergebnisse nach vereinfachtem Verfahren bei Anwendung einer passiven Kühlung sowie die der Simulationen mit Sohlplattenkühlung. Die Randbedingungen entsprechen durchgängig dem Basisfall, mit Ausnahme des jeweils kenntlich gemachten variierten Parameters.

Zunächst erfolgt eine Variation der Nachtlüftung analog zum Referenzfall. Bei Einsatz der passiven Kühlung sind die Differenzen zwischen vereinfachtem und detailliertem Verfahren (Simulation) wesentlich höher als im Referenzfall. Während im Rahmen des vereinfachten Verfahrens bei Kombination der passiven Kühlung mit erhöhter Nachtlüftung immer noch ein F_C -Wert von 0,4 eingeplant werden

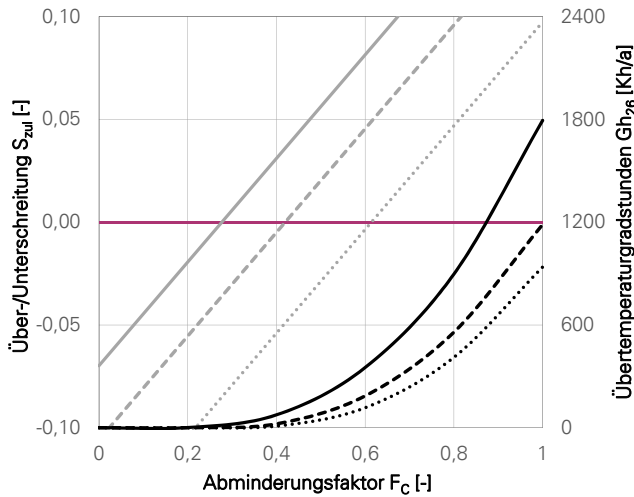
muss, kann bei Durchführung von Simulationen bereits auf einen Sonnenschutz verzichtet werden (Bild 7-2). Kommt keine Nachtlüftung zum Einsatz, ist bei Anwendung des vereinfachten Nachweises ein F_C -Wert von maximal 0,25 erforderlich, nach den Ergebnissen der Simulation muss dieser nur maximal 0,85 betragen.

Ein ähnliches Ergebnis zeigt die Variation der Bauart (Bild 7-3). Bei leichter Bauart ist mit einem F_C -Wert von maximal 0,15 eine Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes im Rahmen des vereinfachten Nachweises trotz passiver Kühlung schwer möglich. Die Simulationen ergeben einen maximalen F_C -Wert von ca. 0,65.

Auch bei Variation der Klimaregion sind die Differenzen der beiden Verfahren ähnlich hoch (Bild 7-4). Eine Verwendung der Testreferenzjahre „extreme Sommer“ führt zu einer Verschiebung der Simulationsergebnisse hin zu denen des vereinfachten Verfahrens, wie Bild 7-5 zeigt. Deutliche Abweichungen der Ergebnisse sind dennoch vorhanden.

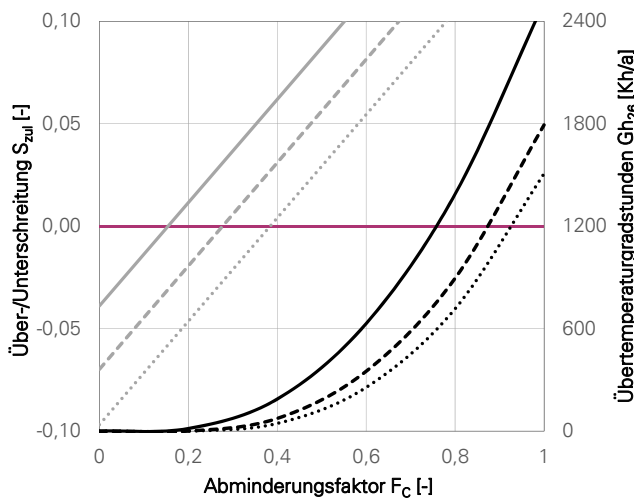
Einige Parameter können anhand des vereinfachten Verfahrens nicht variiert werden, weisen jedoch in Hinblick auf die Simulationsergebnisse einen hohen Einfluss auf die Effizienz der Sohlplattenkühlung auf. So ist es beispielsweise nicht möglich, den Einfluss der Erdreichparameter oder der Geschosshöhe zu berücksichtigen. Da diese Parameter als hohe Einflussfaktoren auf die Effizienz identifiziert wurden, ist eine Variation dieser in Bild 7-6 und Bild 7-7 im Vergleich zum vereinfachten Verfahren dokumentiert.

Die Darstellungen verdeutlichen, dass neben den im vereinfachten Nachweis einbezogenen Parametern weitere Parameter existieren, die einen hohen Einfluss auf die Effizienz des Systems ausüben. Es wird deutlich, dass die aktuell vollzogene Unterscheidung hinsichtlich der Bauart für eine Anrechnung der passiven Kühlung nicht genügt bzw. der Komplexität des jeweiligen Kühlsystems nicht gerecht wird.



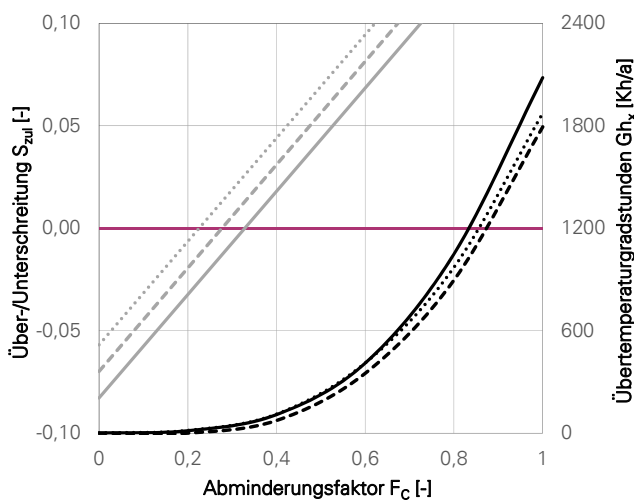
- oNL_Sx (Basis)
- - - NL2_Sx
- ... NL5_Sx
- oNL_Sim (Basis)
- - - NL2_Sim
- ... NL5_Sim

Bild 7-2 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden G_{h26} in Kh/a bei Variation der Nachtlüftung.



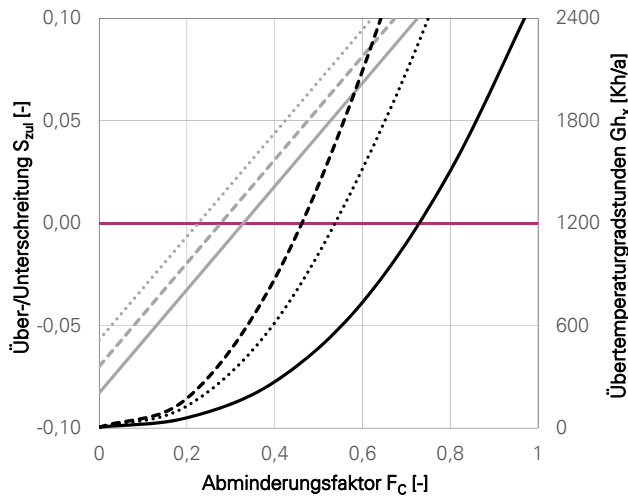
- leicht_Sx
- - - mittel_Sx (Basis)
- ... schwer_Sx
- leicht_Sim
- - - mittel_Sim (Basis)
- ... schwer_Sim

Bild 7-3 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden G_{h26} in Kh/a bei Variation der Bauart.



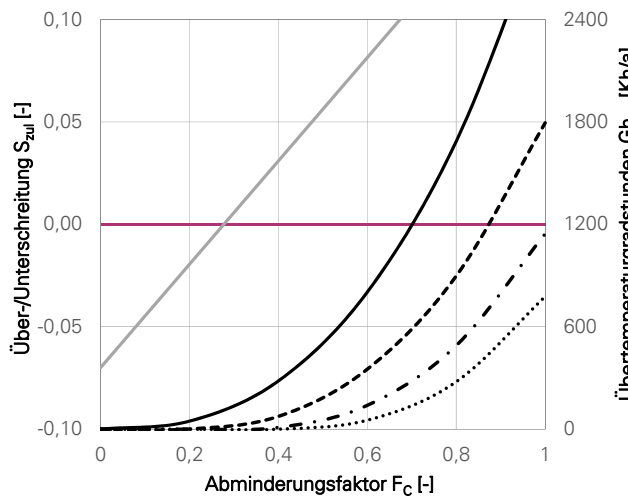
- A_Sx
- - - B_Sx (Basis)
- ... C_Sx
- A_Sim
- - - B_Sim (Basis)
- ... C_Sim

Bild 7-4 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden G_{h26} in Kh/a bei Variation der Klimaregion.



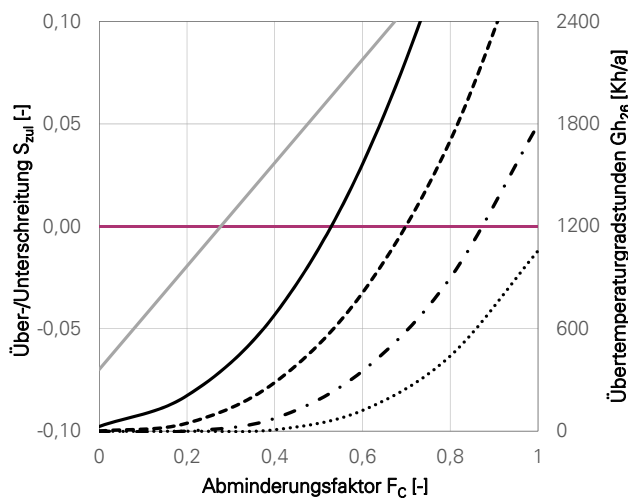
- A_Sx
- - - B_Sx (Basis)
- C_Sx
- A_Somm_Sim
- - - B_Somm_Sim
- C_Somm_Sim

Bild 7-5 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden Gh_{26} in Kh/a bei Variation der Klimaregion, simuliert wurde hier mit den Testreferenzjahren für extreme Sommer.



- Basis_Sx
- E05_Sim
- - - E15_Sim (Basis)
- · - E25_Sim
- E35_Sim

Bild 7-6 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden Gh_{26} in Kh/a bei Variation der Erdscheigenschaften.



- Basis_Sx
- GZ 10_Sim
- - - GZ 5_Sim
- · - GZ 3_Sim (Basis)
- GZ 2_Sim

Bild 7-7 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden Gh_{26} in Kh/a bei Variation der Geschosshöhe.

7.3 Zwischenfazit

Insgesamt betrachtet weisen das vereinfachte Verfahren und das detaillierte Verfahren mittels Simulation im vorliegenden Fall hohe Abweichungen hinsichtlich des nach [DIN 4108-2:2013-02] erforderlichen Sonnenschutzes auf. Die Simulationen führen durchgängig zu einem höheren maximalen Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes F_c . Einerseits ist dies darauf zurückzuführen, dass das vereinfachte Verfahren „auf der sicheren Seite liegend“ ausgelegt ist. Andererseits spielen viele Faktoren bei der passiven Kühlung eine Rolle, die im Rahmen des vereinfachten Verfahrens keine Berücksichtigung finden. Die Auswertungen machen deutlich, dass eine alleinige Unterscheidung nach leichter, mittlerer und schwerer Bauart bei der passiven Kühlung, wie im vereinfachten Nachweis der Fall, nicht ausreichend ist, da andere Parameter ähnlich hohen oder sogar höheren Einfluss auf die Effizienz des Systems ausüben.

Eine Überarbeitung des Sonneneintragskennwerts S_6 , bei der eine Berücksichtigung des eingesetzten Systems vorgenommen wird, wäre daher erstrebenswert. Die vorliegenden Auswertungen zeigen ausschließlich Simulationen zur Sohlplattenkühlung. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass andere Systeme der passiven Kühlung ebenfalls zu hohen Abweichungen zwischen einfachem und detailliertem Nachweisverfahren führen. Um die Potentiale der verschiedenen Systeme herauszuarbeiten, sind weitere umfangreiche Berechnungen erforderlich. Auf eine Ausarbeitung eines konkreten Änderungsvorschlags wird daher an dieser Stelle verzichtet. Eine mögliche Vorgehensweise für eine Überarbeitung des vereinfachten Nachweisverfahrens hinsichtlich der passiven Kühlung könnte sein, zunächst diejenigen Parameter der gängigen passiven Kühlsysteme zu identifizieren, welche hohe Auswirkungen auf die Übertemperaturgradstunden ausüben. Eine Parameterstudie mithilfe thermisch-dynamischer Simulationen kann die Potentiale und Einflussfaktoren der Systeme herausstellen. Dabei ist es von Vorteil in Anlehnung an [Schlitzberger 2014] ein Raummodell zu wählen, das eine hohe Übertragbarkeit auf andere Raumsituationen gewährleistet.

Anstelle der Unterteilung des anteiligen Sonneneintragskennwerts S_6 nach der Bauart ist eine weitere Aufschlüsselung denkbar, bei der nach mehreren Parametern unterschieden wird, so wie es beim Kennwert S_1 der Fall ist. Dieser beinhaltet eine Unterscheidung nach Nutzungsart (Wohn-/Nichtwohngebäude), Klimaregion, Nachtlüftung und Bauart. Weitere wichtige Parameter für den Sonneneintragskennwert S_6 sind beispielsweise: die Art des Systems, die Erreichbarkeitsbedingungen und die Geschosshöhe. Eine weitere Möglichkeit böte eine Definition bestimmter Systemeigenschaften, bei denen eine Verwendung des Sonnen-

eintragskennwerts S_6 unterbunden würde. So könnte das Vorliegen hoher Geschossezahlen, ungünstiger Erdreieigenschaften, niedriger Jahresarbeitszahlen oder hoher Energiebedarfe zu einem Ausschluss der Anrechnung einer passiven Kühlung führen.

8 Planungsempfehlungen

8.1 Planungsempfehlungen für den Einsatz einer Sohlplattenkühlung

Eine Bauteilaktivierung in Kombination mit einer Sohlplattenkühlung kann bei durchdachter Planung und in Kombination mit weiteren Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz einen deutlichen Beitrag zur Senkung der Übertemperaturgradstunden leisten. Neben dem Potenzial zur Reduzierung der sommerlichen Wärmebelastung zeichnet sich die Sohlplattenkühlung durch geringe Investitions- und Betriebskosten aus. Damit die Anforderungen hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes und der thermischen Behaglichkeit bei einem möglichst geringen Energiebedarf Erfüllung finden, kann eine Vielzahl von Vorkehrungen getroffen werden.

Baulicher Wärmeschutz

Grundsätzlich sollte der sommerliche Wärmeschutz von Entwurfsbeginn an eine höhere Aufmerksamkeit erfahren als häufig der Fall. Wird auf vollverglaste Fassaden verzichtet und das Gebäude mit einem außenliegenden Sonnenschutz und der Möglichkeit zur Nachtlüftung ausgestattet, können die normativen Behaglichkeitskriterien oft auch ohne Kühlung erfüllt werden. Erhöhte Behaglichkeitsanforderungen, steigende Außentemperaturen oder Einschränkungen beim baulichen sommerlichen Wärmeschutz können den Einsatz eines Kühlsystems jedoch erfordern.

Für einen langfristig effektiven Betrieb einer Sohlplattenkühlung sollten die thermischen Lasten so weit wie möglich begrenzt werden. Andernfalls besteht das Risiko eines hohen Wärmeeintrags aus dem Gebäude in das Erdreich mit der Folge, dass die Sohlplattenkühlung nicht mehr ihre gewünschte Leistung erzielt. Daher ist die Verwendung eines außenliegenden Sonnenschutzes angebracht. Dies können z. B. Lamellensysteme sein, welche dem Lichteinfall individuell angepasst werden können. Sofern ein außenliegender Sonnenschutz nicht erwünscht ist, kann zumindest ein effektiver innenliegender, z. B. mit geringer Transparenz und erhöhter Reflexion verwendet werden. Möglich sind auch Kombinationen aus einer außenliegenden, ggf. feststehenden Sonnenschutzvorrichtung und einer innenliegenden, die gleichzeitig als Blendschutz dienen kann. Dies ist insbesondere in Bürogebäuden von Vorteil, da an Bildschirmarbeitsplätzen auch im Winter regelmäßig ein Blendschutz erforderlich ist. Bei Betätigung eines außenliegenden Sonnenschutzes zur Verringerung der Blendung würden die solaren Wärmegewinne reduziert. Wird der Blendschutz hingegen über eine zusätzliche

innenliegende Vorrichtung realisiert, erfolgt eine Erhöhung der passiven Solarenergiegewinne und damit eine Reduktion des Heizwärmebedarfs.

Bei der Auswahl der Baustoffe ist es sinnvoll, eine mittlere bis schwere Bauart für das Gebäude vorzusehen, welche gegenüber einer leichten Bauart eine erhöhte Speicherung tagsüber anfallender Wärmelasten ermöglicht und diese nachts durch Lüftung wieder abgeben kann. Als Materialien können Kalksandstein, Beton sowie Porenbeton oder Ziegel zum Einsatz kommen. Wichtig ist, dass die wärmespeichernden Materialien nicht von der Raumluft abgeschirmt sind. Die hohe thermische Speichermasse einer Betondecke nützt wenig, wenn sie durch eine abgehängte Decke an der Wärmespeicherung gehindert wird. Die Kombination aus einem Porenbeton, leichten Trockenbauwänden und abgehängten Decken kann bereits zu einer grundflächenbezogenen wirksamen Wärmespeicherfähigkeit unterhalb von $50 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ führen und damit zu einer leichten Bauart nach [DIN 4108-2:2013-02]. Dies kann vor allem im Nichtwohngebäudebereich, bei welchem die technische Gebäudeausrüstung häufig unterhalb der Decke verläuft und durch abgehängte Decken die Sichtbarkeit genommen wird, problematisch sein. In diesem Fall kann erwogen werden, auf ein Verbergen der Technik zu verzichten. Bei durchdachter gebäudetechnischer Planung können trotz Sichtbarkeit der Lüftungskanäle hohe ästhetische Ansprüche erfüllt werden. Eine Alternative zum sichtbaren Verlauf der Lüftungstechnik im Deckenbereich bietet beispielsweise die Integration dieser in die Fensterbrüstungen. Die brandschutztechnischen Auflagen sind dabei stets im Blick zu behalten.

Sollte eine schwere Bauart, wenn auch der leichten vorzuziehen, beispielsweise aus Kostengründen nicht in Betracht kommen, besteht grundsätzlich die Möglichkeit einer Kompensation der mit der leichten Bauart einhergehenden Nachteile durch andere Maßnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes. Diese können beispielsweise eine Nachtlüftung kombiniert mit einer Reduktion des solaren Wärmeeintrags durch verringerte Fensterflächenanteile und effektive Sonnenschutzvorrichtungen beinhalten. Somit sind auch für Gebäude mit einer leichten Bauart gute Leistungen einer Sohlplattenkühlung erzielbar.

Geschosszahl

Das Verhältnis der Fläche der Geschossdecken zur Fläche der Sohlplatte ist bedeutend für die Leistungsfähigkeit der Sohlplattenkühlung. Im Gegensatz zu anderen erdreichgekoppelten Systemen kann die wärmeübertragende Fläche im Erdreich nicht vergrößert werden, da sie mit der durch das Gebäude zur Verfügung stehenden Fläche einhergeht. Durch eine erhöhte Geschosszahl erhöht sich die Eintrittstemperatur in die Sohlplatte und der in den Geschossdecken zur Kühlung

verfügbare Massenstrom verringert sich entsprechend. Somit ist es wichtig, die Einflussgröße der Geschosshöhe bei der Auswahl eines Kühlsystems mit einzubeziehen. Bis zu einer Geschosshöhe von vier ist beim Berechnungsmodell der vorliegenden Arbeit eine zufriedenstellende Effektivität der Sohlplattenkühlung zu verzeichnen. Im Falle höherer Geschosshöhen bedarf es einer genaueren Überprüfung aller Randparameter und einer Kombination mit weiteren Maßnahmen des sommerlichen Wärmeschutzes. Alternativ ist eine Erwägung anderer passiver Kühlsysteme möglich.

Lüftung

Die Herstellung eines gegenüber der hygienisch erforderlichen Lüftung erhöhten Luftwechsels von $n \geq 2 \text{ h}^{-1}$ durch natürliche oder mechanische Lüftung ist von hoher Bedeutung für die Reduzierung des Überhitzungsrisikos in Gebäuden. Die Senkung der Raumtemperaturen durch Lüftung hat in der Nacht die höchste Wirkung. Jedoch ist auch tagsüber, insbesondere in den frühen Morgen- sowie den späten Abendstunden, ein Luftaustausch sinnvoll, wenn die Außentemperatur geringer als die Innentemperatur ist. Durch die Kombination einer Sohlplattenkühlung mit einer erhöhten bzw. hohen Nachtlüftung sind hinsichtlich des sommerlichen Wärmeverhaltens positive Effekte in Form von geringen Übertemperaturgradstunden zu erzielen. Zudem sind hohe Jahresarbeitszahlen (JAZ) der Sohlplattenkühlung von über 30 möglich. In der vorliegenden Berechnung liegt die JAZ im Basisfall ohne erhöhte Nachtlüftung bei 28. Demgegenüber liegt sie für die erhöhte Nachtlüftung mit einem Luftwechsel von 2 h^{-1} bei 36 und für die hohe Nachtlüftung mit einem Luftwechsel von 5 h^{-1} bei 43. Dies ist dadurch begründet, dass die durch Nachtlüftung verringerten Raumtemperaturen eine geringere Laufzeit der Pumpe erfordern und damit einen geringeren Energiebedarf. Die kürzere Pumpenlaufzeit bringt zudem eine verzögerte Erdreicherwärmung im Verlauf der Kühlperiode mit sich, sodass die Sohlplattenkühlung eine länger anhaltende Wirkung erzielt.

Die Lüftung über ein Öffnen der Fenster ist besonders wirksam, wenn eine Querlüftung über gegenüber liegende Fenster oder über geschossübergreifende Öffnungen in der Fassade und ggf. im Dach möglich ist. In manchen Fällen kann auch ein elektrisch angetriebenes Öffnen der Fenster nützlich sein, z. B. um die Nachtauskühlung regulieren zu können. So können beispielsweise Fensterelemente, die für die manuelle Öffnung nicht zugänglich sind, zur Belüftung des Gebäudes hinzugezogen werden. Die Realisierung einer effektiven natürlichen Lüftung ist anzuraten, da sie hohe Luftwechsel schaffen kann ohne Energiekosten

für die Luftförderung zu benötigen. Sie erfordert jedoch eine durchdachte Gebäudeplanung von Entwurfsbeginn an.

Alternativ kann eine mechanische Lüftung zum Einsatz kommen. Sinnvolle Regelstrategien, welche einen erhöhten Luftaustausch herstellen, wenn die Außenlufttemperatur die Raumlufttemperatur unterschreitet, können eine effektive Wärmeabfuhr erzielen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Hilfsenergiebedarf der Lüftungsanlage bei hohen Luftwechseln ein wirtschaftlich sinnvolles Maß überschreiten kann. Gemäß [Zimmermann 2003] ist eine mechanische Lüftung mit Luftwechseln $> 4 \text{ h}^{-1}$ nicht mehr wirtschaftlich (vgl. Kapitel 2.3.1). Lässt die Gebäudenutzung es zu, so ist die Herstellung erhöhter Luftwechsel über die Fenster oft sinnvoller als über eine mechanische Lüftungsanlage, da der Energiebedarf für die Luftförderung entfällt. Zusätzlich zur natürlichen Lüftung kann jedoch eine Lüftungsanlage für den hygienisch erforderlichen Mindestluftwechsel sorgen.

Klimaregion

In wärmeren Klimaregionen ist es möglich, dass die Sohlplattenkühlung die Raumtemperaturen nicht auf ein ausreichend niedriges Niveau begrenzen kann. Sollte eine sommerheiße Klimaregion C vorliegen, so ist daher anzuraten, den Nutzen durch vorhergehende Simulationen zu überprüfen – insbesondere, wenn das Gebäude insgesamt über einen geringfügigen sommerlichen Wärmeschutz verfügt. Zwar ist ein Einhalten des sommerlichen Wärmeschutzes für die Klimaregion C nicht von erhöhter Schwierigkeit, doch die Wahrscheinlichkeit längerer Zeiträume mit geringer thermischer Behaglichkeit ist erhöht. Dies zeigen die Bewertungen nach [DIN EN 15251:2012-12], welche für die Klimaregion C Überschreitungshäufigkeiten (PMV-Modell) der Kategorie II in Höhe von 920 h/a gegenüber 660 h/a für die Klimaregion B ergeben (vgl. Kapitel 5.3.4).

Bei der Betrachtung des Klimas sollte stets berücksichtigt werden, dass zukünftig mit einem weiteren Anstieg der Außentemperaturen und somit mit einer Steigerung der Häufigkeit sehr heißer Sommer zu rechnen ist. Sinnvoll ist es daher auch vor diesem Hintergrund, die Sohlplattenkühlung als Teil eines ganzheitlichen Konzeptes hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes zu betrachten und mit anderen Maßnahmen zu kombinieren. Eine Möglichkeit kann auch sein, bereits in der Planungsphase eines Gebäudes die Möglichkeit der Nachrüstung mit einem anderen ggf. aktiven Kühlsystem vorzusehen (vgl. Absatz „Zusatzmaßnahmen“ unten). Alternativ zur Sohlplattenkühlung können andere passive Kühlsysteme zum Einsatz kommen, welche eine höhere und konstantere Kühlleistung aufweisen, beispielsweise eine Kühlung über Erdwärmesonden oder Grundwasserbrunnen.

Erdreicheigenschaften

Voraussetzung für eine effektive Sohlplattenkühlung ist, dass ein Erdreich vorliegt, das eine Wärmeleitfähigkeit von mindestens $1,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ aufweist. Der Entscheidung über solch ein System sollte daher unbedingt eine Untersuchung der Erdreicheigenschaften vorausgehen. Bei ungünstigen Erdreichparametern mit einer Wärmeleitfähigkeit von weniger als $1,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ sollten andere Systeme bevorzugt werden, da der Wärmetransport zum umgebenden Erdreich nicht ausreichend ist, um das Risiko auszuschließen, dass das Erdreich sich über die Winterzeit nicht genügend thermisch regeneriert. Bei einer Erdreichwärmeleitfähigkeit von beispielsweise $0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ sinkt die Jahresarbeitszahl der untersuchten Sohlplattenkühlung auf 14. Dies stellt gegenüber einer JAZ von 28 bei einer Wärmeleitfähigkeit von $1,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ im Basisfall einen hohen Effizienzverlust dar.

Wird die Bodenplatte auf einer kapillarbrechenden Schicht aus Kies oder Schotter gebettet, so ist der Einfluss der Wärmeleit- und Wärmespeichereigenschaften auf die Sohlplattenkühlung zu berücksichtigen – insbesondere wenn ein Schaumglaschotter mit niedriger Wärmeleitfähigkeit zum Einsatz kommt. Eine Möglichkeit dennoch das Erdreich als Wärmesenke zu nutzen, ist hier, die Rohre der Sohlplattenkühlung nicht nahe bzw. innerhalb der Bodenplatte, sondern unterhalb der Schotterschicht im vorhandenen Erdreich zu platzieren. Eine thermische Aktivierung der Sohlplatte ist in Folge dieser Maßnahme dann nicht mehr gegeben, da die Rohre durch die Schotterschicht von der Sohlplatte nahezu thermisch entkoppelt ist. Ein Vorteil ist jedoch, dass eine winterliche Nutzung des Erdreichs als Wärmequelle in Kombination mit einer Wärmepumpe ermöglicht wird. Dies erhöht zudem die Wahrscheinlichkeit einer langfristigen Effizienz des Systems aufgrund der wechselseitigen Nutzung und der damit verbundenen Verbesserung der Regeneration des Erdreichs.

Pumpenenergiebedarf

Bei der Entscheidung für eine Sohlplattenkühlung und der Auslegung dieses Systems sollte darauf geachtet werden, den Pumpenenergiebedarf möglichst gering zu halten. Dieser ist maßgeblich von der Gestaltung des Rohrsystems abhängig. Sind die Rohre bereits in/unterhalb der Sohlplatte und in den Geschossdecken verbaut, können Änderungen zur Reduzierung der nötigen Pumpenenergie nur unter hohem Zeit- und Kostenaufwand vorgenommen werden. Als Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind die Rohrnetzauslegung, die daraus resultierenden Druckverluste innerhalb des Netzes und die für das System verwendete Pumpe. Dies gilt für alle passiven Kühlsysteme, bei denen eine Bauteilaktivierung zum Einsatz kommt. Im Rahmen der Rohrnetzauslegung bietet es sich an,

Herstellerdaten einfließen zu lassen, welche die Druckverluste für die verfügbaren Rohrdurchmesser und -materialien beziffern. Diese Kenndaten bestimmen neben den Leitungslängen und Höhendifferenzen innerhalb des Gebäudes letztlich die erforderliche Förderhöhe und sind damit ausschlaggebend für die benötigte Pumpenleistung. Als Pumpen sollten nur Hocheffizienzpumpen zum Einsatz kommen. Diese sind in der Lage, ihre Leistung automatisch an den tatsächlichen Förderbedarf anzupassen. Während unregelmäßige Umwälzpumpen dauerhaft auf der höchsten in Spitzenlastzeiten erforderlichen Leistung laufen, ist die Hocheffizienzpumpe elektronisch geregelt und richtet ihre Leistungsaufnahme nach dem tatsächlich benötigten Förderstrom. Sie zeichnet sich damit durch einen geringeren Energiebedarf aus. Bedingt durch gestiegene Anforderungen der Ökodesign-Richtlinie an Umwälzpumpen können ohnehin fast nur noch Hocheffizienzpumpen auf dem europäischen Markt erworben werden. Sie sind zwar unter Umständen mit höheren Anschaffungskosten gegenüber herkömmlichen unregelmäßigen Umwälzpumpen verbunden, die Kosten während der Laufzeit fallen durch den Einsatz von Hocheffizienzpumpen jedoch geringer aus.

Eine Erhöhung des Massenstroms mit dem Zweck einer Verbesserung der Kühlleistung zeigte sich im Rahmen der Parameterstudie als nicht zielführend. Verbesserungen hinsichtlich der Übertemperaturgradstunden waren nicht sichtbar. Demgegenüber erhöhte sich der Pumpenenergiebedarf bei einer Erhöhung des Massenstroms in der Sohlplatte von 1500 kg/h auf 2000 kg/h deutlich, sodass die Jahresarbeitszahl von 28 (Basisfall) auf 16 sank.

Zusatzmaßnahmen

Bestehen in der Planungsphase eines Gebäudes Bedenken, ob eine Sohlplattenkühlung durch mögliche Klimaveränderungen oder erhöhte Komfortansprüche steigenden Anforderungen an das Kühlsystem noch gerecht wird, können vorbeugende Zusatzmaßnahmen in Betracht gezogen werden. So kann beispielsweise die Möglichkeit einer Nachrüstung mit einem zusätzlichen System vorgesehen werden, das zwar unter Umständen mit höheren Investitions- und Betriebskosten verbunden ist, jedoch gleichzeitig mit einer höheren Kühlleistung aufwartet. Im Zentrum für Umweltbewusstes Bauen in Kassel wurde z. B. der Anschluss für ein Rückkühlwerk an den bestehenden Kühlkreislauf vorbereitet. Über die dafür vorgesehenen Ventile besteht die Möglichkeit bei Bedarf eine zusätzliche Rückkühlung für eine nächtliche Auskühlung des Gebäudes nachträglich zu installieren [Hauser et al. 2004, 24]. Einem durch Einsatz eines sekundären Kühlsystems steigenden elektrischen Energiebedarf mit der Folge einer Erhöhung

der Betriebskosten und des Primärenergiebedarfs kann dabei durch solare Eigenstromerzeugung entgegengewirkt werden.

8.2 Nachweismethodik und Empfehlungen für die Simulation

Der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes ist gemäß [DIN 4108-2:2013-02] über das vereinfachte Sonneneintragskennwerte-Verfahren oder über thermisch-dynamische Gebäudesimulationen zulässig. Bei der Entscheidung für ein passives Kühlsystem stellt sich die Frage, welche Nachweismethodik sich im jeweiligen Fall besser eignet. Im Folgenden wird daher erläutert, unter welchen Voraussetzungen das vereinfachte oder das detaillierte Verfahren über Simulationen eine sinnvolle Anwendung erfahren. Für den Fall, dass die Entscheidung auf die Durchführung von Simulationen entfällt, werden zudem Empfehlungen hinsichtlich der Wahl der Software und der Randbedingungen dokumentiert.

Voraussetzung für die Verwendung des vereinfachten Verfahrens sollte sein, dass die Entscheidung für eine Systemvariante bereits gefallen ist. Mit dem Sonneneintragskennwerte-Verfahren ist zwar ein Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes für Gebäude mit passiver Kühlung möglich, nicht jedoch ein Vergleich verschiedener Systemvarianten, da die Art des Kühlsystems keine Berücksichtigung findet, womit dieses Verfahren nicht der Entscheidungsfindung dienlich ist. Zudem ist die Anwendung des vereinfachten Verfahrens nur sinnvoll, wenn der Nutzen des passiven Kühlsystems für das vorliegende Gebäude aufgrund der vorhandenen Rahmenparameter nicht in Frage steht. Liegen eher ungünstige Randparameter vor – wie z. B. eine niedrige Erdschichtwärmeleitfähigkeit, das Fehlen eines außenliegenden Sonnenschutzes, eine Klimaregion mit erhöhten Außentemperaturen und/oder eine fehlende Möglichkeit der Nachtlüftung – sollte eine Überprüfung der Kühlleistung über eine Simulation stattfinden. Sofern jedoch die Auswahl eines passiven Kühlsystems mit Unterstützung durch einen erfahrenen Fachplaner erfolgt und dieser die Auslegung vornimmt, so stellt das vereinfachte Verfahren eine sinnvolle, unkomplizierte Nachweismethodik dar.

Alternativ zum vereinfachten Verfahren kann der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes gemäß [DIN 4108-2:2013-02] über eine thermisch-dynamische Gebäudesimulation durchgeführt werden. Gegenüber dem vereinfachten Verfahren kann eine Untersuchung der passiven Kühlung mithilfe von Simulationen mehreren Zwecken dienen:

- als Nachweisverfahren, beispielsweise wenn ein Einhalten der Anforderungen mithilfe des vereinfachten Verfahrens nicht zu belegen ist:
Die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes erfolgt beim vereinfachten Verfahren „auf der sicheren Seite liegend“. Somit besteht die Möglichkeit, dass die Anforderungen bei diesem Verfahren nicht erfüllt werden, bei einem Nachweis durch Simulationen jedoch schon.
- zur Entscheidungsfindung, wenn mehrere Kühlsysteme in Betracht kommen
- zur Überprüfung der Kühlleistung, wenn unsicher ist, ob das passive Kühlsystem für das vorliegende Gebäude ausreichend ist
- zur Optimierung des Systems mithilfe von Parameterstudien, beispielsweise zur Untersuchung verschiedener Regelstrategien

Insbesondere wenn mehrere in Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz oder auf das Kühlsystem ungünstige Parameter (s. o.) zusammentreffen, steigt das Risiko, dass eine passive Kühlung die entstehende thermische Belastung nicht ausreichend reduzieren kann. Im Zweifel sind daher thermisch-dynamische Simulationen hilfreich, um den Nutzen zu quantifizieren und damit die Entscheidung für oder gegen das System zu ermöglichen und schließlich die Auslegung zu vereinfachen.

Vor der Durchführung thermisch-dynamischer Gebäudesimulationen bedarf es zunächst der sinnvollen Auswahl einer Software. Dabei ist zu überprüfen, ob das ausgewählte System mit dem Software-Programm abgebildet werden kann. Weitere Argumente, die für eine bestimmte Software sprechen können, sind:

- die Eingabefreiheit:
Hier ist abzuwägen zwischen der Möglichkeit, zahlreiche Parameter zu variieren, und dem ggf. damit verbundenen erhöhten Fehlerrisiko. Steht dem Nutzer eine hohe Zahl an Eingabeparametern zur Verfügung, kann zwar ein möglichst spezifisch definiertes Modell abgebildet werden, gleichzeitig ist jedoch das Risiko höher, Eingaben vorzunehmen, die die tatsächlichen Bedingungen nicht widerspiegeln und zu einem verzerrten Ergebnis führen. Ein sicherer Umgang mit der Software und ein guter Kenntnisstand der Randparameter sind erforderlich.
- die Rechengenauigkeit hinsichtlich des zweidimensionalen Wärmetransports:
Diese ist bei erdreichgekoppelten Systemen von Bedeutung für die Ermittlung einer realistischen Erdreichtemperatur. Die Modellierung erfolgt bei den meisten Verfahren nach der Finite-Differenzen-Methode, bei der das Erdreich in ein numerisch diskretisiertes Gitter zerlegt wird. Die Qualität solch eines

Modells hängt maßgeblich vom Detaillierungsgrad der des Gitters bzw. von der Anzahl der sich ergebenden Knotenpunkte ab.

- der sichere Umgang des Anwenders mit dem Programm:
Die Fehleranfälligkeit von Simulationsprogrammen ist bei Unkenntnis der Software erhöht. Daher sollte eine intensive Auseinandersetzung mit der Software vor der Durchführung von Simulationsstudien stattgefunden haben. Auch die Möglichkeit des regelmäßigen Austausches durch Verwendung im Kollegenkreis kann dabei ein Argument für eine Software darstellen, da insbesondere bei komplexen Softwareprodukten eine gegenseitige Unterstützung bei der Abbildung von Modellen und der Beseitigung von Fehlerquellen sehr hilfreich sein kann.
- die Möglichkeit der Durchführung von Parameterstudien bzw. Variantenbildung:
Dies ist von Vorteil, wenn ein Vergleich verschiedener Systeme oder Systemkonfigurationen stattfinden soll. Beispielsweise beinhaltet der TRNSYS Editor „TRNEdit“ das Tool „Parametric Runs“, welches eine komfortable handhabende Definition mehrerer Varianten mit unterschiedlichen Parametern und eine selbstständig ablaufende Simulation dieser zuvor definierten Varianten nacheinander ermöglicht.

Für die Simulation eines passiven Kühlsystems ist eine Reihe von Randparametern festzulegen. Eine gute Basis hierfür stellen die in [DIN 4108-2:2013-02] definierten Simulationsrandbedingungen dar. Diese beinhalten eine Festlegung der grundlegenden Parameter für thermisch-dynamische Gebäudesimulationen, wie Nutzungszeiten, Luftwechsel, interne Wärmeeinträge und Sonnenschutzsteuerung. Wird ein Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes mithilfe von Simulationen vorgenommen, müssen diese Randbedingungen ohnehin verwendet werden. Für eine Untersuchung der passiven Kühlung, die den tatsächlich vorliegenden Gebäudebetrieb widerspiegeln soll, können die Randbedingungen verändert und verfeinert werden. So ist beispielsweise eine Anpassung der Nutzungszeiten oder der Lüftungsregelung entsprechend der tatsächlichen Bedingungen möglich.

Im Falle einer passiven Kühlung sind weitere Randbedingungen festzulegen, wie im Rahmen der vorliegenden Arbeit dokumentiert wurde. Beispielsweise sind die Eigenschaften des Erdreichs bei der Simulation anzugeben. Hier ist es möglich die Ergebnisse einer Bodenuntersuchung einfließen zu lassen. Liegt eine Kenntnis über die Bodeneigenschaften nur in Form des Gesteinstyps vor, nicht jedoch der konkreten zugehörigen Parameter, welche die Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs bestimmen, kann eine Einschätzung dieser Parameter mithilfe der [VDI 4640-1:2010-06] vorgenommen werden. Sie enthält eine Angabe der Wärmeleit-

fähigkeit, der Rohdichte und der spez. Wärmekapazität für eine Vielzahl an Gesteinstypen, allerdings mit entsprechend großen Bandbreiten.

Für die bei Simulation und Planung einer Bauteilaktivierung erforderliche Definition der Rohreigenschaften können Herstellerdaten zur Hilfe genommen werden. Einige Hersteller stellen Datenblätter ihrer Rohrsysteme frei zur Verfügung, die u. a. die Druckverluste für verschiedene Rohrdurchmesser beinhalten. Diese Werte müssen für eine Ermittlung des Hilfsenergiebedarfs bekannt sein. Es steht frei, auch Literaturangaben oder Erfahrungswerte aus ausgeführten Gebäudeobjekten in die Bestimmung der Rohrdurchmesser und -abstände einfließen zu lassen.

Die thermisch-dynamische Gebäudesimulation kann unter Umständen zeitintensiv sein, lohnt sich jedoch mit Hinblick auf den hohen Erkenntniswert. Die Simulationen fördern eine sinnvolle Entscheidungsfindung und Auslegung passiver Kühlsysteme, sodass im Betrieb bessere Ergebnisse hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit sowie der anfallenden Betriebskosten und damit der Nutzerzufriedenheit zu verzeichnen sind.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In Hinblick auf zukünftig steigende Außentemperaturen bzw. häufiger auftretende Hitzeperioden wie beispielsweise in den Jahren 2003, 2006 und 2018 kommt der Herstellung behaglicher Innentemperaturen eine erhöhte Bedeutung zu. Ein verstärkter Einsatz von handelsüblichen Klimageräten, welche die Temperatur mithilfe eines Kältemittels herunterkühlen, wäre hierbei kontraproduktiv, da diese durch einen gegenüber passiven Kühlsystemen hohen Einsatz elektrischer Energie und somit einen erhöhten Verbrauch fossiler Energieträger der Umwelt zusätzlichen Schaden zufügen. Erst durch einen steigenden Anteil erneuerbarer Energien bis hin zu einer klimaneutralen Stromversorgung, kann die Ausstattung von Gebäuden mit Klimaanlage eine unter umwelttechnischen Gesichtspunkten sinnvolle Maßnahme darstellen. Doch auch dann sollte es die Regel sein, im ersten Schritt bauliche Maßnahmen zur Reduktion der solaren Wärmelasten und Senkung des Kühlenergiebedarfs zu nutzen. Im Falle erhöhter Anforderungen bzw. Ansprüche an die Raumtemperatur sind passive Kühlsysteme einzusetzen und nur in Ausnahmefällen z. B. bei hohen Behaglichkeitsanforderungen ist eine Unterstützung der Kühlung durch aktive Methoden vorzusehen.

Die vorliegende Ausarbeitung zeigt, dass passive Kühlsysteme in der Lage sind, die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz und darüber hinaus an den thermischen Komfort zu erfüllen und dabei mit einem geringen elektrischen Energiebedarf aufwarten.

Unter günstigen Voraussetzungen zählt auch die Sohlplattenkühlung, der zum Teil ein im Vergleich zu anderen erdreichgekoppelten Systemen geringerer Nutzen zugesprochen wird, zu den effizienten passiven Kühlsystemen. Als günstige Voraussetzungen können z. B. eine Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs von mindestens $1,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, eine niedrige Geschosshöhe bis zu vier sowie eine Klimaregion A bis B genannt werden. Bei dem betrachteten kleinen Mehrfamilienhaus können die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz nach [DIN 4108-2:2013-02] auch im nach Südwesten ausgerichteten Wohnzimmer mit einem gegenüber den anderen Räumen erhöhten Fensterflächenanteil unter Einsatz einer Sohlplattenkühlung eingehalten werden. Bei Vorliegen eines außenliegenden Sonnenschutzes sind in den meisten Fällen sogar Übertemperaturgradstunden von unter 100 Kh/a zu verzeichnen. Mit einem innenliegenden Sonnenschutz sind erwartungsgemäß Komforteinbußen

wahrscheinlich, doch auch hier wurde der Grenzwert von 1200 Kh/a unter unterschiedlichsten Ausgangsbedingungen unterschritten. Um in Veränderung befindlichen Klimaverhältnissen mit einer Tendenz zu heißen Sommern gerecht zu werden, ist eine Kombination mit weiteren Maßnahmen wie beispielsweise einer Nachtlüftung anzuraten. Bei Vorliegen hoher Geschosshöhen, einer leichten Bauart oder eines Erdreichs mit niedriger Wärmeleitfähigkeit sollten tendenziell andere passive Systeme mit einer höheren Kühlleistung bevorzugt werden, insbesondere wenn zusätzlich dazu ein außenliegender Sonnenschutz fehlt.

Die veranschaulichten Potenziale der Sohlplattenkühlung sind auf Einfamilienhäuser in vielen Teilen übertragbar. Hier sind bessere Ergebnisse hinsichtlich des sommerlichen Wärmeverhaltens zu erwarten, da Einfamilienhäuser in der Regel niedrige Geschosshöhen aufweisen und damit eine höhere Kühlleistung der Sohlplattenkühlung möglich ist. Der praktische Nutzen eines solchen Systems wurde in [Hauser et al. 2011] bereits an einem realen Einfamilienhaus messtechnisch untersucht. Hier wurde eine Sohlplattenkühlung an eine Fußbodenheizung gekoppelt, was in den betrachteten Sommerzeiträumen zu behaglichen Innentemperaturen von unter 26 °C führte.

Für Bürogebäude kommt die Sohlplattenkühlung ebenfalls als mögliches passives Kühlsystem in Betracht. Zu beachten ist jedoch, dass sie sich gegenüber Wohngebäuden hinsichtlich der Nutzungszeiten, der Lüftungsmöglichkeiten und der internen Wärmelasten (Abwärme technischer Geräte und der Beleuchtung, höhere Nutzerzahl) unterscheiden. Erhöhte Wärmelasten und eine fehlende Möglichkeit in der Nacht und an den Wochenenden erhöhte Luftwechsel zu erzeugen können zur Folge haben, dass der Nutzen der Sohlplattenkühlung gegenüber Wohngebäuden geringer ausfällt. Sofern jedoch eine geringe Geschosshöhe vorliegt und sich die thermische Belastung durch solare Einstrahlung sowie interne Wärmelasten auf einem niedrigen Niveau befinden, kann auch bei Bürogebäuden eine Sohlplattenkühlung nützlich sein. Vorteilhaft ist die zusätzliche Ermöglichung einer Nachtlüftung zur Komfortsteigerung, wobei diese aufgrund von Einbruchrisiken sowie Witterungsschutz eine entsprechende Lüftungsplanung erfordert oder mechanisch erfolgen sollte.

Eine Einhaltung der Anforderungen an die thermische Behaglichkeit nach [DIN EN 15251:2012-12] ist mit der Sohlplattenkühlung möglich. Dabei ist zu differenzieren, welches Modell für eine Komfortbewertung verwendet wird. Bei

Anwendung des adaptiven Komfortmodells ist eine Einhaltung der Grenzwerte in den meisten betrachteten Fällen gegeben. Da dies jedoch streng genommen nur für Gebäude ohne maschinelle Kühlung gilt und die passive Kühlung per Definition nach [DIN EN 15251:2012-12] zur maschinellen Kühlung zählt, ist für die Sohlplattenkühlung das PMV-Modell zu verwenden. Bei einer entsprechenden Bewertung ist eine Unterschreitung der Grenzwerte nur unter günstigen Voraussetzungen gegeben: Ein außenliegender Sonnenschutz, gute Erdreichseigenschaften oder eine hohe Nachtlüftung können beispielsweise zu einer Einhaltung des moderateren 5 %-Kriteriums verhelfen. Die Sohlplattenkühlung ist somit fallweise in der Lage die Grenzwerte des PMV-Modells ausreichend zu unterschreiten. Dennoch wäre ein neues Modell oder ein von üblichen maschinell gekühlten Gebäuden abweichendes Kriterium für Gebäude mit passiver Kühlung bei der Bewertung nach [DIN EN 15251:2012-12] aus folgenden Gründen wünschenswert: Im aktuellen PMV-Bewertungsverfahren kommen Gebäuden mit passiver Kühlung dieselben Anforderungen des thermischen Komforts zu wie Gebäuden, welche über eine maschinelle aktive Kühlung verfügen. Bei einer Anpassung der Komfortbewertung könnte der Tatsache Rechnung getragen werden, dass passive Kühlsysteme gegenüber aktiven keine konstanten Innentemperaturen aufrechterhalten können, aber einen deutlich geringeren Energiebedarf aufweisen und damit die unter ökologischen Gesichtspunkten günstigere Kühlmethode darstellen.

Die berechneten Arbeitszahlen der Sohlplattenkühlung liegen für das Wohnzimmer bei einem Sonnenschutz mit einem Abminderungsfaktor F_c von 0,8 meistens zwischen 25 und 33, bei sehr günstigen Rahmenbedingungen oder Vorliegen eines außenliegenden Sonnenschutzes können sogar Arbeitszahlen von 50 bis 70 erzielt werden. Somit kann die Sohlplattenkühlung nicht nur unter thermischen, sondern auch unter energetischen Aspekten als effizientes Kühlsystem überzeugen. In [Hauser et al. 2011] wird darüber hinaus ein energetischer Nutzen im Winter erwähnt, da die Wärmeverluste über die Bodenplatte aufgrund der Erwärmung des Erdreichs im Sommer reduziert werden. Hinzu kommt, dass die Investitionskosten bei einer Sohlplattenkühlung sehr gering sind, da nur die Verlegung der Rohre und der Einsatz einiger hydraulischer Komponenten erforderlich sind. Ein zusätzlicher Erdreichaushub ist gegenüber anderen Erdreichsystemen nicht notwendig. Daher ist ein erhöhter Einsatz der Sohlplattenkühlung in Neubauten anzustreben. Die Effizienz der Sohlplattenkühlung könnte noch gesteigert werden, indem eine Verwendung der Rohre zur Beheizung im Winter mithilfe einer Wärmepumpe

hinzugezogen wird. Dies würde eine Regeneration des Untergrunds herbeiführen und einer thermischen Ermüdung entgegenwirken. Sole-Wasser-Wärmepumpen können zudem höhere Jahresarbeitszahlen und damit einen geringeren Heizenergiebedarf als Luft-Wasser-Wärmepumpen erzielen. Eine Platzierung der Rohre unterhalb ist hierbei der Platzierung innerhalb der Bodenplatte vorzuziehen.

Wie sich bei einem Vergleich des vereinfachten Nachweises des sommerlichen Wärmeschutzes mittels Sonneneintragskennwerte-Verfahren und des detaillierten Nachweises mittels Simulation nach [DIN 4108-2:2013-02] für das vorliegende Mehrfamilienhaus mit Sohlplattenkühlung zeigt, ist eine deutliche Differenz der Anforderungshöhen zu verzeichnen. Anzumerken ist zudem, dass einige Parameter beim Sonneneintragskennwerte-Verfahren vernachlässigt werden müssen. Parameter, deren Berücksichtigung im Rahmen des vereinfachten Nachweises aufgrund ihres hohen Einflusses auf den Nutzen der Sohlplattenkühlung wünschenswert wäre, sind die Erdreichparameter und die Geschosshöhe. Für eine Weiterentwicklung des vereinfachten Sonneneintragskennwerte-Verfahrens wären weiterführende Berechnungen erforderlich, die auch andere passive Kühlsysteme einbeziehen. Dabei könnte eine Korrektur des anteiligen Sonneneintragskennwerts S_6 in Betracht gezogen werden sowie eine Verknüpfung an verschiedene Parameter, wie beispielsweise die Erdreich-eigenschaften. Alternativ besteht die Möglichkeit der Definition von Ausschlusskriterien, unter welchen der Sonneneintragskennwert S_6 nicht angerechnet werden darf.

Der Einfluss von Grundwasserströmungen sowie einer dichten Bebauung auf die Wirksamkeit einer Sohlplattenkühlung wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit vernachlässigt. Das Vorhandensein von Grundwasserströmungen führt ohne Zweifel zu einer Erhöhung des Kühleffekts, da durch diese eine niedrige Erdreichtemperatur aufrechterhalten wird. Berechnungen mit Simulationsprogrammen, denen eine Abbildung der Grundwasserströmungen gelingt, könnten diese Effizienzsteigerung quantitativ beurteilen. Eine Untersuchung der Bebauung wäre von Interesse, da bislang nicht hinreichend erforscht wurde, ob und ab welcher Dichte ein Sohlplattenkühler nicht mehr sinnvoll eingesetzt werden kann. In [Bockelmann et al. 2010, 119f] wird vermerkt, dass die Aufrechterhaltung einer Wärmesenke insbesondere im innerstädtischen Bereich aufgrund der hohen Bebauungsdichte stark erschwert ist. Der Einfluss dichter Bebauung stellt auch für andere oberflächennahe Erdwärmesysteme

eine zu erforschende Thematik dar. Alternativ zur oberflächennahen kann die mitteltiefe Geothermie bis zu einer Tiefe von 400 m eine Option bei dichter Bebauung, geringer Flächenverfügbarkeit oder auch hohen Komfortanforderungen sein. Hierzu sind die Forschungsansätze der Hochschule Darmstadt zu beobachten [Ritter 2018]. Simulationsmodelle, denen eine Abbildung der Einflüsse dicht stehender Gebäude und deren Gebäudetemperaturen auf die Erwärmung des Erdreichs gelingen, wären von Interesse. Auch Untersuchungen mikroklimatischer Einflüsse im städtischen Bereich im Zusammenhang mit oberflächennahen Erdreichsystemen sind ein spannender Forschungsansatz.

Der Fokus der Forschung sowie der Normierung im Bereich von Erdwärmesystemen liegt bisher überwiegend auf der Bereitstellung von Wärme. Vor dem Hintergrund steigender Außentemperaturen wäre eine Erweiterung der Ansätze auf die Nutzung als Wärmesenke mithilfe einer freien Kühlung bzw. auf die kombinierte Nutzung des Erdreichs als Wärmequelle und -senke erstrebenswert. Insbesondere die Normierung sollte der verstärkten Nachfrage nach günstigen Kühlsystemen, auch innerhalb des Wohnungsbaus, nachkommen. Neue bzw. überarbeitete Auslegungs-, Berechnungs- sowie Nachweisverfahren für die passive Kühlung mithilfe des Erdreichs sollten angeboten werden, damit die Verwendung solcher Systeme zukünftig vereinfacht wird und diese damit eine verstärkte Nutzung erfahren. Dies gilt zum einen für Richtlinien, welche bei der Auslegung und Berechnung unterstützen, wie beispielsweise die Richtlinien-Reihe VDI 4640 „Thermische Nutzung des Untergrunds“. Zum anderen sind Normenwerke betroffen, welche Bewertungs- und Nachweisverfahren zum thermischen Komfort bzw. zum sommerlichen Wärmeschutz enthalten, wie [DIN 4108-2:2013-02] und [DIN EN 15251:2012-12].

Literaturverzeichnis

- [Barthel et al. 2010] Barthel, C.; Franke, M.; Müller, P.; Dittmar, C. (2010): Analyse der Vorstudien für Wohnungslüftung und Klimageräte. Veröffentlichung im Rahmen des Projektes "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes). Hg. v. Umweltbundesamt.
- [Berger 2014a] Berger, R. (2014a): Indirekt und adiabat - Teil 1. Natürliche Kühlung statt mechanische Kälteerzeugung. In: TAB Technik am Bau 2014 (6), S. 38–42.
- [Berger 2014b] Berger, R. (2014b): Indirekt und adiabat - Teil 2. Vergleich etablierter und neu entwickelter Systeme. In: TAB Technik am Bau 2014 (7-8), S. 62–65.
- [Bergmann 2014] Bergmann, U. (2014): Wasserbedarf von (nassen) Rückkühlwerken. In: KKA Kälte Klima Aktuell (04). Online verfügbar unter: http://www.kka-online.info/artikel/kka_Wasserbedarf_von_nassen_Rueckkuehlwerken_2050227.html, zuletzt geprüft am 10.02.2016.
- [Bettgenhäuser et al. 2011] Bettgenhäuser, K.; Boermans, T.; Offermann, M.; Krechting, A.; Becker, D. (2011): Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutz-durch-reduzierung-des-energiebedarfs>, zuletzt geprüft am 20.10.2018.
- [Blümel et al. 2002] Blümel, E.; Fink, C.; Kouba, R. (2002): Passive Kühlkonzepte für Büro- und Verwaltungsgebäude. Leitfaden zur Planung von passiven Kühlkonzepten mittels Nachtlüftung und luft- bzw. wasserdurchströmten Erdreichwärmetauschern. Online verfügbar unter: <http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien10.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2014.
- [Blümel et al. 2001] Blümel, E.; Fink, C.; Reise, C. (2001): Luftdurchströmte Erdreichwärmetauscher. Handbuch zur Planung und Ausführung. AEE INTEC; Fraunhofer ISE.
- [Bockelmann et al. 2010] Bockelmann, F.; Fisch, N. M.; Kipry, H. (2010): Erdwärme für Bürogebäude nutzen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (BINE-Fachbücher).
- [Bußmann 2012] Bußmann, W. (2012): Geothermie - Energie aus dem Innern der Erde. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (BINE-Fachbücher).
- [Delcroix et al. 2013] Delcroix, B.; Kummert, M.; Daoud, A.; Hiller, M. (2013): Improved conduction transfer function coefficients generation in TRNSYS multizone building model. In: Proceedings of BS 2013.

- [DWD 2014] Deutscher Wetterdienst (2014): Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Handbuch. Offenbach. Online verfügbar unter: <http://www.dwd.de/TRY>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.
- [Dibowski 2003] Dibowski, G. (2003): Auf Basis umfangreicher Messdatensätze experimentell und numerisch validierte Regeln zur optimierten Auslegung von Luft-Erdwärmetauschern. Dissertation. Universität Kassel.
- [Dibowski et al. 2004a] Dibowski, G.; Herkert, J.; Wortmann, R.; Gabrysch, K. (2004a): Luft-Erdwärmetauscher - Planungsleitfaden Teil 2. 2) Technische Planung. AG Solar. Online verfügbar unter: http://www.dlr.de/sf/de/desktopdefault.aspx/tabid-7160/12036_read-28631, zuletzt geprüft am 24.07.2014.
- [Dibowski et al. 2004b] Dibowski, G.; Herkert, J.; Wortmann, R.; Gabrysch, K. (2004b): Luft-Erdwärmetauscher - Planungsleitfaden Teil 2. 6) Standardisierte Datenblätter. AG Solar. Online verfügbar unter: http://www.dlr.de/sf/de/desktopdefault.aspx/tabid-7160/12036_read-28631, zuletzt geprüft am 24.07.2014.
- [Dibowski et al. 2004c] Dibowski, G.; Herkert, J.; Wortmann, R.; Gabrysch, K. (2004c): Luft-Erdwärmetauscher - Planungsleitfaden Teil 2. 7) Anhang. AG Solar. Online verfügbar unter: http://www.dlr.de/sf/de/desktopdefault.aspx/tabid-7160/12036_read-28631, zuletzt geprüft am 24.07.2014.
- [Dibowski und Wortmann 2002] Dibowski, G.; Wortmann, R. (2002): Luft-Erdwärmetauscher - Teil 1: Systeme für Wohngebäude. Grundlagen, Planung, Simulation, Projekte. Kurzfassung. AG Solar NRW. Online verfügbar unter: http://www.dlr.de/sf/de/desktopdefault.aspx/tabid-7160/12036_read-28631, zuletzt geprüft am 24.07.2014.
- [DIN 4108-2:2003-07] DIN 4108-2:2003-07: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- [DIN 4108-2:2013-02] DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- [DIN 4108-4:2013-02] DIN 4108-4:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte.
- [DIN 4108-6:2003-06] DIN 4108-6:2003-06: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.
- [DIN EN 1264-1:2011-09] DIN EN 1264-1:2011-09: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung – Teil 1: Definitionen und Symbole.

- [DIN EN 1264-2:2013-03] DIN EN 1264-2:2013-03: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung – Teil 2: Fußbodenheizung: Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden.
- [DIN EN 12524:2000-07] DIN EN 12524:2000-07: Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte.
- [DIN EN 12792:2004-01] DIN EN 12792:2004-01: Lüftung von Gebäuden – Symbole, Terminologie und graphische Symbole.
- [DIN EN 15251:2007-08] DIN EN 15251:2007-08: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- [DIN EN 15251:2012-12] DIN EN 15251:2012-12: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- [DIN EN ISO 6946:2008-04] DIN EN ISO 6946:2008-04: Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren.
- [DIN EN ISO 7730:2006-05] DIN EN ISO 7730:2006-05: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit.
- [DIN EN ISO 11855:2016-11] DIN EN ISO 11855:2016-11: Umweltgerechte Gebäudeplanung – Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme – Teile 1 bis 5.
- [DIN EN ISO 13370:2008-04] DIN EN ISO 13370:2008-04: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmeübertragung über das Erdreich – Berechnungsverfahren.
- [DIN EN ISO 13791:2012-08] DIN EN ISO 13791:2012-08: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren.
- [DIN V 18599-7:2016-10] DIN V 18599-7:2016-10: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 7: Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau.
- [EnEV2014] Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18.11.2013 (EnEV 2014). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013, Teil I, Nr. 67, Seite 3951 - 3990.
- [Erhorn und Bergmann 2015] Erhorn, H.; Bergmann, A. (2015): Auswertung der Modellvorhaben im Netzwerk Effizienzhaus Plus bezüglich verschiedener Kennwerte ihrer transparenten Bauteile. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. Stuttgart.

- [Fecht 2013] Fecht, N. (2013): Rückkühltechnik schont Ressourcen: cool und nachhaltig. In: Fokus Technik VDMA-Nachrichten September 2013, S. 72–79. Online verfügbar unter: <http://www.cooling-towers.info/article/-/articleview/10802648>, zuletzt geprüft am 22.02.2016.
- [Fecht 2015] Fecht, N. (2015): Rückkühltechnik – effizient und hygienisch. In: Fokus Technik VDMA-Nachrichten Oktober 2015, S. 74–80. Online verfügbar unter: <http://www.cooling-towers.info/article/-/articleview/10802532>, zuletzt geprüft am 22.02.2016.
- [Fink et al. 2002] Fink, C.; Blümel, E.; Kouba, R.; Heimrath, R. (2002): Passive Kühlkonzepte für Büro- und Verwaltungsgebäude mittels luft- bzw. wasserdurchströmten Erdreichwärmetauschern. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energie. Gleisdorf. Online verfügbar unter: <http://www.aee-intec.at/0uploads/dateien9.pdf>, zuletzt geprüft am 07.08.2014.
- [Fort o. J.] Fort, K. (o. J.): Type 360: Floor heating and hypocaust. Volketswil.
- [Glück 1999] Glück, B. (1999): Thermische Bauteilaktivierung. Nutzen von Umweltenergie und Kapillarrohren. Heidelberg: C. F. Müller Verlag.
- [Grundfos] Grundfos Germany (Hg.): Grundfos Product Center. Schnellauslegung. Online verfügbar unter: <https://product-selection.grundfos.com/front-page.html?pumpsystemid=322111071&time=1516618709383&qcid=228471442>, zuletzt geprüft am 22.01.2018.
- [Günther o. J.] Günther, M. (o. J.): Richtige Planung und Ausführung von beheizten sowie gekühlten Fußbodenkonstruktionen. Entwicklungstendenzen der Flächenheizung und -kühlung unter besonderer Berücksichtigung der Gebäuderenovation. Hg. v. Uponor-Velta GmbH & Co. KG. Norderstedt/Dresden. Online verfügbar unter: <http://www.ibf-troisdorf.de/files/Uponor-Velta2>, zuletzt geprüft am 30.06.2016.
- [Händel 2011] Händel, C. (2011): Regenerative Energien in der Klima- und Lüftungstechnik. FGK-Status-Report Nr. 10. 2. Aufl. Fachverband Gebäude-Klima e.V. Online verfügbar unter: http://www.downloads.fgk.de/136_FGK_SR_Regenerative_V6_110909_klein.pdf, zuletzt geprüft am 01.02.2016.
- [Hauser 1977] Hauser, G. (1977): Rechnerische Vorherbestimmung des Wärmeverhaltens großer Bauten. Dissertation. Universität Stuttgart.
- [Hauser 2001] Hauser, G. (2001): Wasserdurchströmte Bauteile zur Kühlung von Holzhäusern – Entwicklung konstruktiver Lösungen und Quantifizierung ihrer Wirkung. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 12272. Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH. Kassel (IBH 296/99).

- [Hauser et al. 2002] Hauser, G.; Hausladen, G.; de Saldanha, M.; Sager, C. (2002): Forscher drin, Forschung dran. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen - Kassel. Konzept - Planung - Bau. Projektteilbericht "SolarOpt". Kassel.
- [Hauser et al. 2004] Hauser, G.; Kaiser, J.; Rösler, M.; Schmidt, D. (2004): Energetische Optimierung, Vermessung und Dokumentation für das Demonstrationsgebäude des Zentrums für Umweltbewusstes Bauen. Solaroptimiertes Bauen, Teilkonzept 3. Kassel.
- [Hauser und Kempkes 1998] Hauser, G.; Kempkes, C. (1998): Wasserdurchströmte Decken zur Raumkonditionierung. Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH. Kassel (IBH 176/97).
- [Hauser et al. 2011] Hauser, G.; Lindauer, E.; Nimtsch, A.; Sinnesbichler, H. (2011): Kühlwirkung einer an die Sohlplatte gekoppelten Fußbodenheizung - demonstriert an einem bewohnten Einfamilienhaus. In: Bauphysik 33 (2), S. 94–98.
- [Hausladen et al. 2004] Hausladen, G.; Hellwig, R. T.; Nowak, W.; Schramek, E.-R.; Grothmann, T. (2004): 26 °C - falsch verstandener Arbeitsschutz? In: Bauphysik 26 (4), S. 197–204.
- [Hiller und Schulz 2015] Hiller, M.; Schulz, M. (2015): Das dynamische Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm TRNSYS. In: Bauphysik Kalender 2015: Simulationen und Rechenverfahren in der Bauphysik. Berlin, S. 343–376.
- [Hirsch et al. 2016] Hirsch, H.; Hüsing, F.; Rockendorf, G. (2016): Modellierung oberflächennaher Erdwärmeübertrager für Systemsimulationen in TRNSYS. In: Proceedings BauSIM 2016. Dresden, S. 653–659.
- [Huber und Schuler 1997] Huber, A.; Schuler, O. (1997): Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Huber Energietechnik, Ingenieur- und Planungsbüro SIA. Zürich. Online verfügbar unter: http://www.hetag.ch/download/HU_EWS1_SB.pdf, zuletzt geprüft am 10.02.2017.
- [Ihle 2006] Ihle, C. (2006): Klimatechnik mit Kältetechnik. 4. Aufl. Neuwied: Werner Verlag (Der Heizungsingenieur, Bd. 4).
- [Janßen und Hirsch 2016] Janßen, S.; Hirsch, H. (2016): TRNSYS Type 710. Thermisches Modell eines horizontalen Erdwärmekollektors. Institut für Solarenergieforschung ISFH, Janßen Energieplanung.
- [Kabus 2009] Kabus, M. (2009): Adiabate Kühlung - "Kühlen ohne Strom". Hg. v. EnergieAgentur NRW. Wuppertal. Online verfügbar unter: http://www.energieagentur.nrw.de/virtuell/downloads/adiabate_kuehlung.pdf, zuletzt geprüft am 09.07.2014.
- [Kalz 2009] Kalz, D. E. (2009): Heating and Cooling Concepts employing environmental Energy and thermo-active Building Systems for low-energy Buildings. Dissertation. Universität Karlsruhe.

- [Katzschner et al. 2009] Katzschner, L.; Maas, A.; Schneider, A. (2009): Das städtische Mikroklima: Analyse für die Stadt- und Gebäudeplanung. In: Bauphysik 31 (1), S. 18–24.
- [Klauß und Kirchhof 2010] Klauß, S.; Kirchhof, W. (2010): Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V. Kassel.
- [Koenigsdorff 2011] Koenigsdorff, R. (2011): Oberflächennahe Geothermie für Gebäude – Grundlagen und Anwendungen zukunftsfähiger Heizung und Kühlung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [Kusuda und Achenbach 1965] Kusuda, T.; Achenbach, P. R. (1965): Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States. ASHRAE Transactions, Vol. 71, Part 1.
- [Lam und Hiller 2014] Lam, J.; Hiller, M. (2014): Schwierigkeiten bei der Verwendung der TRY Daten 2011 für Deutschland in der thermischen Simulation. In: Proceedings BauSIM 2014. Aachen, S. 395–401.
- [LBNL] Lawrence Berkeley National Laboratory (Hg.): Berkeley Lab WINDOW 7.4 - Windows & Daylighting Software. For NFRC Certification and modeling Complex Glazing Systems. Online verfügbar unter: <https://windows.lbl.gov/software/window/window.html>, zuletzt geprüft am 08.02.2017.
- [Loose 2013] Loose, P. (2013): Erdwärmenutzung. Versorgungstechnische Planung und Berechnung. 4. Aufl. Berlin: VDE VERLAG.
- [Maas et al. 2013] Maas, A.; Kempkes, C.; Schlitzberger, S. (2013): Sommerlicher Wärmeschutz - Neufassung der DIN 4108-2. In: Bauphysik 35 (3), S. 155–161.
- [Mitalas und Arseneault 1972] Mitalas, G. P.; Arseneault, J. G. (1972): Fortran IV program to calculate z-transfer functions for the calculation of transient heat transfer through walls and roofs. National Research Council Canada, Division of building research. DBR Computer Program No. 33. Ottawa. Online verfügbar unter: <http://www.ibpsa.us/publications>, zuletzt geprüft am 17.03.17.
- [Münter 2015] Münter, M. (2015): Prima Klima für alte Schriften. Mehr Komfort auch für Besucher durch Sanieren und Erweitern der Stadtbibliothek Nürnberg. Hg. v. FIZ Karlsruhe - Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH. BINE Informationsdienst. Online verfügbar unter: <http://www.bine.info/publikationen/projektinfos/publikation/prima-klima-fuer-alte-schriften/>, zuletzt geprüft am 21.10.2018.
- [Olesen und Dossi 2004] Olesen, B. W.; Dossi, F. C. (2004): Operation and control of activated slab heating and cooling systems. CIB World Building Congress. Online verfügbar unter: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB1743.pdf>, zuletzt geprüft am 08.06.2017.

- [Perez et al. 1988] Perez, R.; Stewart, R.; Seals, R.; Guertin, T. (1988): The Development and Verification of the Perez Diffuse Radiation Model. Sandia Report SAND88-7030. Albuquerque, New Mexico.
- [Pfafferot 2002] Pfafferot, J. (2002): Abschlussbericht Monitoring: Bürogebäude Lamparter - Thermisches Gebäudeverhalten. Fraunhofer ISE. Freiburg. Online verfügbar unter: <http://www.enob.info/de/neubau/projekt/details/passiv-buerohaus-lamparter/>, zuletzt geprüft am 09.07.2014.
- [Pfafferot 2003] Pfafferot, J. (2003): Passive Kühlung mit Nachtlüftung. Hg. v. FIZ Karlsruhe GmbH. BINE Informationsdienst. Online verfügbar unter: <http://www.bine.info/publikationen/publikation/passive-kuehlung-mit-nachtlueftung/>, zuletzt geprüft am 23.11.2015.
- [Pfafferot et al. 2002] Pfafferot, J.; Herkel, S.; Voss, K. (2002): Abschlussbericht Monitoring I: Verwaltungsgebäude DB Netz AG Hamm. Fraunhofer ISE. Freiburg. Online verfügbar unter: <http://www.enob.info/de/neubau/projekt/details/verwaltungsgbaeude-als-investorenobjekt/>, zuletzt geprüft am 01.08.2014.
- [Pfafferot und Kalz 2007] Pfafferot, J.; Kalz, D. (2007): Thermoaktive Bauteilsysteme. Nichtwohnungsbauten energieeffizient heizen und kühlen auf hohem Komfortniveau. Hg. v. FIZ Karlsruhe GmbH. BINE Informationsdienst. Online verfügbar unter: http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Themen-Infos/I_2007/themen0107internetx.pdf, zuletzt geprüft am 16.04.2019.
- [Pfafferot et al. 2015] Pfafferott, J.; Kalz, D.; Koenigsdorff, R. (2015): Bauteilaktivierung. Einsatz - Praxiserfahrungen - Anforderungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [Pfeiffenberger 2014] Pfeiffenberger, U. (2014): Planung und Projektierung von Kühltürmen. Eigenschaften, Auswahl und Betrieb von Rückkühlwerken (Kälte Klima Aktuell, Ausgabe 03/2014). Online verfügbar unter: http://www.kka-online.info/artikel/kka_Planung_und_Projektierung_von_Kuehltuermen_2021948.html, zuletzt geprüft am 10.02.2016.
- [Plate 2016] Plate, J. (2016): Kühlen mit dem Flächenheizsystem: Möglichkeiten und Grenzen. Online verfügbar unter: <https://www.haustec.de/klima-lueftung/klimatechnik/kuehlen-mit-dem-flaechenheizsystem-moeglichkeiten-und-grenzen>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2017, zuletzt geprüft am 14.10.2018.
- [Radermacher und Maas 2013] Radermacher, A.; Maas, A. (2013): A cross-sectional analysis of using the ground as heat source and heat sink. In: Book of full papers sb13 - Sustainable Building Conference, S. 1539-1546. München.

- [Radermacher 2013] Radermacher, A. (2013): Das Erdreich als Wärmequelle und Wärmesenke - Eine Analyse aus der projektübergreifenden Begleitforschung der Forschungsinitiative EnOB. Universität Kassel. Online verfügbar unter: <http://www.enob.info/de/analysen/analyse/details/das-erdreich-als-waermequelle-und-waermesenke/>, zuletzt geprüft am 11.07.2014.
- [Radermacher und Maas 2018] Radermacher, A.; Maas, A. (2018): Modellierung einer Sohlplattenkühlung mit TRNSYS und Untersuchung der Effizienz am Beispiel eines kleinen Mehrfamilienhauses. In: BauSIM 2018. 7. Deutsch-Österreichische IBPSA-Konferenz. Tagungsband, S. 319-326. Karlsruhe.
- [Ranft und Frohn 2004] Ranft, F.; Frohn, B. (2004): Natürliche Klimatisierung. Basel.
- [Recknagel et al. 2015a] Recknagel, H.; Sprenger, E.; Albers, K.-J. (Hg.) (2015a): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik. Band 1. 77. Aufl. München: Deutscher Industrieverlag.
- [Recknagel et al. 2015b] Recknagel, H.; Sprenger, E.; Albers, K.-J. (Hg.) (2015b): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik. Band 2. 77. Aufl. München: Deutscher Industrieverlag.
- [REHAU 2011] REHAU AG & Co (2011): RAUTITAN – Die neue Generation. Druckverlusttabellen Heizung. Online verfügbar unter: <https://www.rehau.com/download/655178/drucktabelle-rautitan-heizung.pdf>, zuletzt geprüft am 23.01.2018.
- [REHAU 2012] REHAU AG & Co (2012): Technische Information. Flächenheizung/-kühlung Betonkerntemperierung. Online verfügbar unter: <https://www.rehau.com/download/1469158/technische-information-betonkerntemperierung.pdf>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.
- [REHAU 2016a] REHAU AG & Co (2016a): RAUGEO Systemtechnik. Innovativ heizen, kühlen und sparen mit Erdwärme. Technische Information. Online verfügbar unter: <https://www.rehau.com/download/1473302/raugeo-technische-information.pdf>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.
- [REHAU 2016b] REHAU AG & Co (2016b): Technische Information. Flächenheizung/-kühlung Wohnbau. Online verfügbar unter: <https://www.rehau.com/download/1468402/technische-information-flaechenheizung-wohnbau.pdf>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.
- [Rietschel und Fitzner 2008] Rietschel, Hermann; Fitzner, Klaus (2008): Raumklimatechnik. Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik. 16. Aufl. Berlin: Springer. Online verfügbar unter: <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-68267-7>, zuletzt geprüft am 01.02.2016.
- [Ritter 2018] Ritter, V. (2018): Regelstrategie für einen Wärmepumpenbetrieb einer Verbundanlage mit mitteltiefen Erdwärmesonden. In: BauSIM 2018. 7. Deutsch-Österreichische IBPSA-Konferenz. Tagungsband, S. 327-335. Karlsruhe.

- [Rumohr et al. 2017] Rumohr, S.; Hoffmann, M.; Fechner, N. (2017): Erdwärmennutzung in Hessen. Leitfaden für Erdwärmesondenanlagen zum Heizen und Kühlen. 5. Aufl. Hg. v. Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. Wiesbaden. Online verfügbar unter: https://www.energieland.hessen.de/mm/Erdwaermeleitfaden_01_2017.pdf, zuletzt geprüft am 27.12.2019.
- [Schlitzberger 2014] Schlitzberger, S. (2014): Anpassung und Entwicklung von Planungswerkzeugen für den sommerlichen Mindestwärmeschutz und zur Komfortbewertung des Sommerfalls. Dissertation. Universität Kassel.
- [Schneider 2012] Schneider, A. (2012): Einfluss des Mikroklimas auf das energetische und thermische Verhalten von Gebäuden. Dissertation. Universität Kassel.
- [Schneider und Maas 2010] Schneider, A.; Maas, A. (2010): Einfluss des Mikroklimas auf das energetische und thermische Verhalten von Gebäuden am Beispiel des Standortes Kassel. In: Bauphysik 32 (6), S. 348–358.
- [Schwenk et al. 2016] Schwenk, C.; Maas, A.; Gross, R.; Dittmer, H.; Schneider, A.; Krause, M.; Stiegel, H. (2016): Monitoring einer zentralen Energieversorgung aus erneuerbaren Energien für ein Verwaltungszentrum. Schlussbericht. Universität Kassel; Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. Kassel.
- [Stober und Bucher 2012] Stober, I.; Bucher, K. (2012): Geothermie. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- [VDI 2047-2:2015-01] VDI 2047:2015-01: Rückkühlwerke - Blatt 2: Sicherstellung des hygienegerechten Betriebs von Verdunstungskühlanlagen (VDI-Kühlturmregeln).
- [VDI 2073-1:2014-05] VDI 2073:2014-05: Hydraulik in Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung - Blatt 1: Hydraulische Schaltungen.
- [VDI 4640-1:2010-06] VDI 4640:2010-06: Thermische Nutzung des Untergrunds - Blatt 1: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte.
- [VDI 4640-2:2001-09] VDI 4640:2001-09: Thermische Nutzung des Untergrundes - Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen.
- [E VDI 4640-2:2015-05] VDI 4640:2015-05: Thermische Nutzung des Untergrundes - Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Entwurf.
- [VDI 4640-4:2004-09] VDI 4640:2004-09: Thermische Nutzung des Untergrundes - Blatt 4: Direkte Nutzungen.
- [VDI 4640-5:2016-08] VDI 4640:2016-08 „Thermische Nutzung des Untergrundes - Blatt 5: Thermal Response Test“.
- [VDI 4710-3:2011-03] VDI 4710:2011-03: Meteorologische Grundlagen für die technische Gebäudeausrüstung - Blatt 3: t,x-Korrelationen der Jahre 1991 bis 2005 für 15 Klimazonen in Deutschland.
- [E VDI 6020:2016-09] VDI 6020:2016-09: Anforderungen an thermisch-energetische Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation. Entwurf.

- [VDI 6034:2011-02] VDI 6034:2011-02: Raumkühlflächen - Planung, Bau und Betrieb.
- [VDI e.V. et al. 2013] VDI e.V.; VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hg.) (2013): VDI-Wärmeatlas. 11. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [Transsolar 2014a] Transsolar Energietechnik GmbH (Hg.): TRNSYS 17 - a TRaNsient SYstem Simulation program. Volume 4 Mathematical Reference. 2014-05 for TRNSYS 17.02.0000.
- [Transsolar 2014b] Transsolar Energietechnik GmbH (Hg.): TRNSYS 17 - a TRaNsient SYstem Simulation program. Volume 7 Programmer's Guide. 2014-05 for TRNSYS 17.02.0000.
- [Transsolar o. J.] Transsolar Energietechnik GmbH: User Service – TRNSYS-FAQ-Liste. Online verfügbar unter: http://trnsys.de/docs/userservice/userservice_faq_de.htm, zuletzt geprüft am 23.02.2017.
- [Transsolar 2018] Transsolar Energietechnik GmbH (2018): TRNSYS 18 Komplexe Verglasungssysteme. Neues Add-On des Mehrzonen-Gebäudemodells (Type 56). Online verfügbar unter: http://www.trnsys.de/download/de/T18_flyer_CFS_de.pdf, zuletzt geprüft am 31.01.2018.
- [Uponor 2009] Uponor GmbH (2009): Praxishandbuch der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) – Installationssysteme, Flächenheiz- und kühlssysteme; Vertragsrecht für Architekten und Ingenieure. Berlin.
- [Wilo 2016] Wilo Schweiz AG (Hg.) (2016): Pumpenfibel. Grundlagen der Pumpentechnik. 6. Aufl. Online verfügbar unter: http://www.wilo.ch/fileadmin/ch/Pumpenfibel_DE_LR.pdf, zuletzt geprüft am 22.01.2018.
- [Wimmer 2004] Wimmer, A. (2004): Thermoaktive Bauteilsysteme - Ein neuer simulationstechnischer Berechnungsansatz. Dissertation, Universität Kassel.
- [Ziesing 2017] Ziesing, H.-J. (2017): Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2016. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. Berlin.
- [Ziller 2015] Ziller, F. (2015): Software zur Darstellung von Prozessen im Mollier-h,x-Diagramm. Version: ILK Dresden. Online verfügbar unter: <http://www.ilkdresden.de/hxdia>, zuletzt geprüft am 18.02.2016.
- [Zimmermann 2003] Zimmermann, M. (2003): Handbuch der passiven Kühlung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Abbildungsverzeichnis

Bild 2-1 Auslegungswerte für die operative Innentemperatur von Gebäuden ohne maschinelle Kühlanlage, dargestellt als Funktion des exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur nach [DIN EN 15251:2012-12].	13
Bild 2-2 Empfohlene Temperaturbereiche für die operative Innentemperatur von Gebäuden mit maschineller Kühlung, nach [DIN EN 15251:2012-12] und [Pfafferott et al. 2015, 48], hier dargestellt für die Wohnnutzung. Zum Vergleich sind die Grenzen für Gebäude ohne maschinelle Kühlung in grau zu sehen.	14
Bild 2-3 Empfohlene Temperaturbereiche für die operative Innentemperatur von Gebäuden mit maschineller Kühlung, nach [DIN EN 15251:2012-12] und [Pfafferott et al. 2015, 48], hier dargestellt für die Büronutzung. Zum Vergleich sind die Grenzen für Gebäude ohne maschinelle Kühlung in grau zu sehen.	15
Bild 2-4 Konstruktionsmöglichkeiten der Bauteilaktivierung, vgl. [Pfafferott et al. 2015, 26] und [DIN EN 1264-1:2011-09], eigene Darstellung.	20
Bild 2-5 Prinzip der Bauteilaktivierung im Winter- und Sommerbetrieb bei Kombination mit einer Wärmepumpe und einer Kühlung über Erdwärmesonden.	21
Bild 2-6 Kennlinien für die Vorlauftemperatur im Heiz- und Kühlbetrieb in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur nach [Olesen und Dossi 2004], eigene Darstellung.	23
Bild 2-7 Prinzip der erhöhten (links) und hohen (rechts) natürlichen Nachtlüftung.	27
Bild 2-8 Verschiedene Bauarten von Nass-Kühltürmen vgl. [Rietschel und Fitzner 2008, 517] und [VDI e.V. et al. 2013, 1669], eigene Darstellung.	29
Bild 2-9 Beispiel für die Integration eines druckbelüfteten Nass-Rückkühlwerks in die Dachzentrale eines Gebäudes, vgl. [Pfeiffenberger 2014] und [VDI e.V. et al. 2013, 1669], eigene Darstellung.	30
Bild 2-10 Prinzip der adiabaten Kühlung mit Platzierung der Lüftungszentrale im Keller. Die Abluft wird befeuchtet, kühlt ab und entzieht der Zuluft Wärme mittels eines Wärmeübertragers.	34
Bild 2-11 Prinzip der Bauteilaktivierung mit Kühlung über Erdwärmesonden mit Doppel-U-Sonden.	38
Bild 2-12 Prinzip der Bauteilaktivierung mit Kühlung über Energiepfähle.	41
Bild 2-13 Prinzip der Bauteilaktivierung mit Kühlung über die Sohlplatte.	44
Bild 2-14 Prinzip der Bauteilaktivierung mit Kühlung über einen Erdwärmekollektor.	45
Bild 2-15 Prinzip der Bauteilaktivierung mit Kühlung über einen Grundwasserbrunnen. Rechts: Förderbrunnen, links: Schluckbrunnen.	47
Bild 2-16 Prinzip der Lüftung mit Kühlung über einen Luft-Erdwärmeübertrager, Platzierung der Lüftungszentrale im Keller, vgl. [Blümel et al. 2001, 17], eigene Darstellung.	51
Bild 3-1 Geometrie A des Prüfraums nach [DIN EN ISO 13791:2012-08], eigene Darstellung.	63
Bild 3-2 Gegenüberstellung der Übertemperaturgradstunden für verschiedene Abminderungsfaktoren des Sonnenschutzes F_c und Orientierungen mit den Programmen HAUSER und TRNSYS bei erhöhter Nachtlüftung.	64

Bild 3-3 Gegenüberstellung der Übertemperaturgradstunden für verschiedene Abminderungsfaktoren des Sonnenschutzes F_c und Orientierungen mit den Programmen HAUSer und TRNSYS bei fehlender Nachtlüftung.....	64
Bild 3-4 „Mehrfamilienhaus klein mit sechs Wohneinheiten“ aus der Modellgebäude-Datenbank – Ansicht Nord-West [Klauß und Kirchhof 2010, 53].	70
Bild 3-5 Grundriss Erdgeschoss des kleinen freistehenden Mehrfamilienhauses, erstellt und modifiziert auf Basis von [Klauß und Kirchhof 2010].	72
Bild 3-6 Nordwest-ansicht des kleinen Mehrfamilienhauses, erstellt und modifiziert auf Basis von [Klauß und Kirchhof 2010].	73
Bild 3-7 Südostansicht des kleinen Mehrfamilienhauses, erstellt und modifiziert auf Basis von [Klauß und Kirchhof 2010].	73
Bild 3-8 Zuordnung der Bauteilaktivierung (BTA)/Sohlplattenkühlung (SPK) für eine Wohnung.	74
Bild 3-9 Beispiel für die Einteilung einer Decke in verschiedene „Knoten“ mit Angabe der Materialeigenschaften (Produkte aus Rohdichte und spez. Wärmekapazität sowie Wärmeleitfähigkeiten).....	75
Bild 3-10 Schematische Darstellung der kombinierten relevanten Types für die Variante A. Type 56: Gebäudemodell, Type 360: Bauteilaktivierung, Type 710: Erdwärmekollektor..	76
Bild 3-11 Schematische Darstellung der kombinierten relevanten Types für die Variante B. Type 56: Gebäudemodell, Type 360: Bauteilaktivierung sowie Sohlplattenkühlung, Type 1244: Erdreichmodell.	77
Bild 3-12 Schematische Darstellung der kombinierten relevanten Types für die Variante C. Type 56: Gebäudemodell, Type 360: Bauteilaktivierung sowie Sohlplattenkühlung und Erdreich, Type 77: Ungestörte Erdreichtemperatur in 10 m Tiefe.....	78
Bild 3-13 Verlauf der Erdreichtemperatur, Sohlplattentemperatur an der Innenseite und der Fluidtemperatur gemäß Simulation über einen Zeitraum von fünf Jahren für Variante A, Zone „Wohnen OG“ bei einem Abminderungsfaktor von 0,7.....	80
Bild 3-14 Schematische Darstellung der Rohrführung nach Tichelmann.	82
Bild 3-15 Leistungsaufnahme und Gesamtwirkungsgrad einer Hocheffizienz-Umwälzpumpe (Grundfos ALPHA2) in Abhängigkeit des Volumenstroms in % nach [Grundfos] im vorgegebenen Betriebspunkt.	86
Bild 4-1 Übertemperatur-gradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für den Referenzfall ohne Kühlung für die vier Räume der Westwohnungen. Randbedingungen wie Basisfall, jedoch ohne Kühlung.	100
Bild 4-2 Übertemperatur-gradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für den Basisfall mit Kühlung für die vier Räume der Westwohnungen.....	101
Bild 4-3 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für verschiedene Luftwechselkonfigurationen – mit und ohne Sohlplattenkühlung im Wohnzimmer OG. Die Bedeutung der Abkürzungen kann Tabelle 3-12 entnommen werden.	102
Bild 4-4 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation der Bauart. Aufgrund des hohen Unterschieds zwischen dem Wohnzimmer im OG und im DG bei leichter Bauart, sind hier beide dargestellt.....	103
Bild 4-5 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für verschiedene Geschossezahlen (GZ) im Wohnzimmer OG.....	104

Bild 4-6 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für verschiedene Kellernutzungsarten im Wohnzimmer OG: Variation Raumsolltemperatur und Luftwechsel im Keller.....	105
Bild 4-7 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für verschiedene Konstruktionen der Bodenplatte.	105
Bild 4-8 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für verschiedene Wärmeschutzniveaus der Außenwände.	106
Bild 4-9 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation des Massenstroms in der Sohlplatte. Abkürzungen: m-const 1500: Der Massenstrom beträgt bei aktiver Sohlplattenkühlung konstant 1500 kg/h. m-var 1500: Er variiert je nach erforderlichem Massenstrom zwischen 4 Stufen.	107
Bild 4-10 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für verschiedene Erdreich Eigenschaften. Kürzel siehe Tabelle 3-10.	108
Bild 4-11 Übertemperaturgradstunden G_{h_x} in Kh/a für drei verschiedene Testreferenzjahre, jeweils für mittlere Jahre und Jahre mit extremen Sommern („som“) sowie das zukünftige TRY 04 („zuk“).	109
Bild 4-12 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für drei verschiedene Stadteffekte im Vergleich zum Normaljahr TRY 04.	111
Bild 4-13 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Erhöhung der internen Wärmeeinträge.	112
Bild 4-14 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation des Rohrabstands der Bauteilaktivierung.	112
Bild 4-15 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für verschiedene Arten der Bauteilaktivierung und zwei verschiedene Rohrdurchmesser.	113
Bild 4-16 Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation des Rohrdurchmessers und des Rohrabstands der Sohlplattenkühlung.	114
Bild 5-1 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen. Referenzfall, $F_c = 0,8$	118
Bild 5-2 Überschreitungshäufigkeiten der Kategorie II bei Variation des Abminderungsfaktors des Sonnenschutzes F_c für den Referenzfall, jeweils für das adaptive Modell und das PMV-Modell (vollständigkeitshalber).....	118
Bild 5-3 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen. Basisfall, $F_c = 0,8$	119
Bild 5-4 Überschreitungshäufigkeiten der Kategorie II bei Variation des Abminderungsfaktors des Sonnenschutzes F_c für den Basisfall, jeweils für das PMV-Modell und das adaptive Modell, Wohnzimmer OG.....	120
Bild 5-5 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen bei erhöhter Nachtlüftung (NL2), $F_c = 0,8$	121
Bild 5-6 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen bei hoher Nachtlüftung (NL5), $F_c = 0,8$	121
Bild 5-7 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen bei leichter Bauart, $F_c = 0,8$	122

Bild 5-8 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen bei schwerer Bauart, $F_c = 0,8$. 122	122
Bild 5-9 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen, Variante E05, $F_c = 0,8$ 123	123
Bild 5-10 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen, Variante E25, $F_c = 0,8$ 123	123
Bild 5-11 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen, Variante E35, $F_c = 0,8$ 124	124
Bild 5-12 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen bei Klimaregion A (TRY 02), $F_c = 0,8$ 125	125
Bild 5-13 Operative Innentemperatur in Abhängigkeit vom gleitenden Mittelwert der Außentemperatur mit Darstellung der Komfortgrenzen bei Klimaregion C (TRY 12), $F_c = 0,8$ 125	125
Bild 5-14 Gegenüberstellung der Überschreitungshäufigkeiten der oberen Grenze der Kategorie II für die ausgewählten Parametervariationen im Vergleich zum Basisfall (mittlere Bauart, E15, oNL, GZ3, FBT, TRY 04) bei einem F_c -Wert von 0,8. 126	126
Bild 6-1 Jahresarbeitszahl [-] und Energiebedarf für die Umwälzpumpe [kWh/a] in Abhängigkeit vom Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes F_c für den Basisfall. 129	129
Bild 6-2 Gegenüberstellung der Energiebedarfe und Jahresarbeitszahlen für die ausgewählten Parametervariationen im Vergleich zum Basisfall (mittlere Bauart, E15, oNL, GZ3, FBT, TRY 04) bei einem F_c -Wert von 0,8. 130	130
Bild 7-1 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a für den Referenzfall (ohne Kühlung) bei Variation der Nachtlüftung. 133	133
Bild 7-2 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation der Nachtlüftung. 135	135
Bild 7-3 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation der Bauart. 135	135
Bild 7-4 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation der Klimaregion. 135	135
Bild 7-5 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation der Klimaregion, simuliert wurde hier mit den Testreferenzjahren für extreme Sommer. 136	136
Bild 7-6 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation der Erdreichigenschaften. 136	136
Bild 7-7 Über- und Unterschreitung des zulässigen Sonneneintragskennwerts vs. Übertemperaturgradstunden $G_{h_{26}}$ in Kh/a bei Variation der Geschosshöhe. 136	136

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Beschreibung der Anwendbarkeit der verwendeten Kategorien nach [DIN EN 15251:2012-12].....	12
Tabelle 2-2 Beispiele empfohlener Kategorien für die Auslegung maschinell geheizter und gekühlter Gebäude nach [DIN EN 15251:2012-12].....	13
Tabelle 2-3 Eigenschaften von Kühltürmen.....	28
Tabelle 2-4 Leistungsdaten der Systeme zur adiabaten Verdunstungskühlung gemäß [Berger 2014b].....	37
Tabelle 2-5 Einfluss der Anordnung von Erdwärmesonden auf die Eignung zur direkten thermischen Nutzung nach [VDI 4640-4:2004-09].....	39
Tabelle 2-6 Aufteilung der Einflussfaktoren für die Auslegung von Luft-Erdwärmeübertragern nach [Dibowski und Wortmann 2002, 11].....	49
Tabelle 2-7 Höchstens zulässige Temperaturänderungen des in das Erdreich zurückkehrenden Wärmeträgermediums gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur, bzw. des zurückgeleiteten Grundwassers nach [VDI 4640-2:2001-09], siehe auch [Loose 2013, 100].....	52
Tabelle 2-8 Höchstens zulässige Temperaturänderungen des in das Erdreich zurückkehrenden Wärmeträgermediums gegenüber der ungestörten Erdreichtemperatur, bzw. des zurückgeleiteten Grundwassers nach neuem Entwurf des Blatt 2 zu VDI 4640 [E VDI 4640-2:2015-05].....	53
Tabelle 2-9 Einflussfaktoren auf die Auslegung geothermischer Anlagen nach [Bockelmann et al. 2010, 33].....	54
Tabelle 2-10 Übersicht der Voraussetzungen und Grenzen passiver Kühlsysteme, vgl. [Fink et al. 2002], [Pfafferot 2003], [Dibowski und Wortmann 2002, 21].....	58
Tabelle 3-1 Außenwandflächen und fassadenbezogener Fensterflächenanteil des MFH sowie die resultierenden Fensterflächen.....	71
Tabelle 3-2 Grund- und Fensterflächen der einzelnen Räume und des gesamten Gebäudes sowie der resultierende grundflächenbezogene Fensterflächenanteil.....	72
Tabelle 3-3 Veränderung der Übertemperaturgradstunden über einen Zeitraum von 10 Jahren für Variante A, Zone „Wohnen OG“ bei einem Abminderungsfaktor des Sonnenschutzes F_c von 0,7.....	80
Tabelle 3-4 Berechnung der Förderhöhe für die Auslegung der Pumpenleistung mit R nach [REHAU 2016b, 115], [REHAU 2016a, 27] und REHAU 2011, 89], Werte gerundet.....	84
Tabelle 3-5 Belastungsprofil einer Hocheffizienz-Umwälzpumpe (Grundfos ALPHA2) nach [Grundfos] im vorgegebenen Betriebspunkt.....	86
Tabelle 3-6 konvektive Wärmeübergangskoeffizienten nach Anhang A.1 [DIN EN ISO 6946:2008-04].....	91
Tabelle 3-7 Verwendete Baumaterialien und ihre Eigenschaften.....	93
Tabelle 3-8 Kennwerte der Außenbauteile für die untersuchten Wärmeschutzniveaus.....	94
Tabelle 3-9 Kennwerte der Fenster gemäß Programmbibliothek und Simulation.....	95
Tabelle 3-10 Kennwerte der untersuchten Varianten der Erdreicheigenschaften nach Tabelle 1 in [VDI 4640-1:2010-06].....	95

Tabelle 3-11 Beispiele für Gesteinstypen der untersuchten Varianten nach Tabelle 1 in [VDI 4640-1:2010-06].	96
Tabelle 3-12 Übersicht der variierten Parameter. Der Basisfall ist jeweils fettgedruckt und mit (Basis) gekennzeichnet.	97
Tabelle 5-1 Empfohlene Kriterien für die Überschreitungen der Grenzen der jeweiligen Kategorie gemäß [DIN EN 15251:2012-12], Anhang G.	117
Tabelle 6-1 Berechnung des Energiebedarfs der Umwälzpumpe und der Jahresarbeitszahl für den Basisfall bei einem F_c -Wert von 0,8.	128

Anhang A Strahlungsdaten

Tabelle A-1 Geografische Koordinaten der Testreferenzjahre und Ermittlung der Eingabeparameter für den Strahlungsprozessor in TRNSYS.

Geografische Koordinaten und Angaben für die Umrechnung der Strahlung	Testreferenzjahr TRY							
	01 Bremerhaven	02 Rostock	03 Hamburg	04 Potsdam	05 Essen	06 Bad Marienberg	07 Kassel	08 Braunlage
M: gemessen, B: Berechnet ^{a)}	B	M	M	M	B	B	B	B
Standardlängengrad L_{St} [°] ^{b)}	15°O -15	15°O -15	15°O -15	15°O -15	15°O -15	15°O -15	15°O -15	15°O -15
Längengrad L_x (Longitude) [°] ^{b)}	8°35'O -8,58	12°05'O -12,08	10°00'O -10,00	13°04'O -13,07	6°58'O -6,97	7°58'O -7,97	9°27'O -9,45	10°36'O -10,60
Breitengrad (Latitude) [°]	53°32'N 53,53	54°11'N 54,18	53°38'N 53,63	52°23'N 52,38	51°24'N 51,40	50°40'N 50,67	51°18'N 51,30	51°44'N 51,73
shift = $L_{St} - L_x$ [°]	-6,42	-2,92	-5,00	-1,93	-8,03	-7,03	-5,55	-4,40

mit Type 16

Parameter „shift in solar time“ [°] ^{c)}	1,08	0,00	0,00	0,00	-0,53	0,47	1,95	3,10
---	------	------	------	------	-------	------	------	------

mit Type 15-7

Parameter „longitude“ L_x [°] ^{d)}	-16,08	-15,00	-15,00	-15,00	-14,47	-15,47	-16,95	-18,10
---	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Geografische Koordinaten und Angaben für die Umrechnung der Strahlung	Testreferenzjahr TRY						
	09 Chemnitz	10 Hof	11 Fichtelberg	12 Mannheim	13 Mühdorf	14 Stötten	15 Garmisch- Partenkirchen
M: gemessen, B: Berechnet ^{a)}	M	B	M	M	B	B	B
Standardlängengrad L_{St} [°] ^{b)}	15°O -15	15°O -15	15°O -15	15°O -15	15°O -15	15°O -15	15°O -15
Längengrad L_x (Longitude) [°] ^{b)}	12°52'O -12,87	11°53'O -11,88	12°57'O -12,95	8°33'O -8,55	12°30'O -12,50	9°52'O -9,87	11°04'O -11,07
Breitengrad (Latitude) [°]	50°48'N 50,80	50°19'N 50,32	50°26'N 50,43	49°31'N 49,52	48°17'N 48,28	48°40'N 48,67	47°29'N 47,48
shift = $L_{St} - L_x$ [°]	-2,13	-3,12	-2,05	-6,45	-2,50	-5,13	-3,93

mit Type 16

Parameter „shift in solar time“ [°] ^{c)}	0,00	4,38	0,00	0,00	5,00	2,37	3,57
---	------	------	------	------	------	------	------

mit Type 15-7

Parameter „longitude“ L_x [°] ^{d)}	-15,00	-19,38	-15,00	-15,00	-20,00	-17,37	-18,57
---	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

^{a)} Gemessene Strahlungsdaten: Mittelwerte für die vergangene Stunde der Wahren Ortszeit (WOZ).

Berechnete Strahlungsdaten: Instantanwerte für die volle Stunde Mitteleuropäischer Zeit (MEZ).

^{b)} Osten entspricht in TRNSYS einem negativen Wert.

^{c)} korrigiert für „B“ um 30 min (7,5°) und für „M“ um shift (entspricht 0).

^{d)} korrigiert für „B“ um 30 min (7,5°) und für „M“ um shift (entspricht L_{St}).

Anhang B Geometrie

Anhang B.1 Flächenberechnung

Zone Wohnen	Volumen [m ³]	
	79,66	
Bauteil	Fläche [m ²]*	Orientierung
Außenwand, brutto	16,55	Süden
Fenster	7,98	Süden
Außenwand, netto	8,57	Süden
Außenwand, brutto	14,01	Osten/Westen
Fenster	5,68	Osten/Westen
Außenwand, netto	8,33	Osten/Westen
		angrenzend an Zone
Innenwand	14,01	Nachbar
Innenwand	3,70	Treppenhaus
Innenwand	8,24	Bad
Innenwand, brutto	4,61	Flur
Tür	1,89	Flur
Innenwand, netto	2,72	Flur
Fußboden	32,50	
Decke	32,50	

*Innenmaße

Zone Schlafen	Volumen [m ³]	
	51,60	
Bauteil	Fläche [m ²]*	Orientierung
Außenwand, brutto	13,23	Norden
Fenster	2,86	Norden
Außenwand, netto	10,37	Norden
Außenwand, brutto	9,56	Osten/Westen
Fenster	3,22	Osten/Westen
Außenwand, netto	6,34	Osten/Westen
		angrenzend an Zone
Innenwand	9,56	Treppenhaus
Innenwand	8,24	Bad
Innenwand, brutto	4,61	Flur
Tür	1,89	Flur
Innenwand, netto	2,72	Flur
Fußboden	21,06	
Decke	21,06	

*Innenmaße

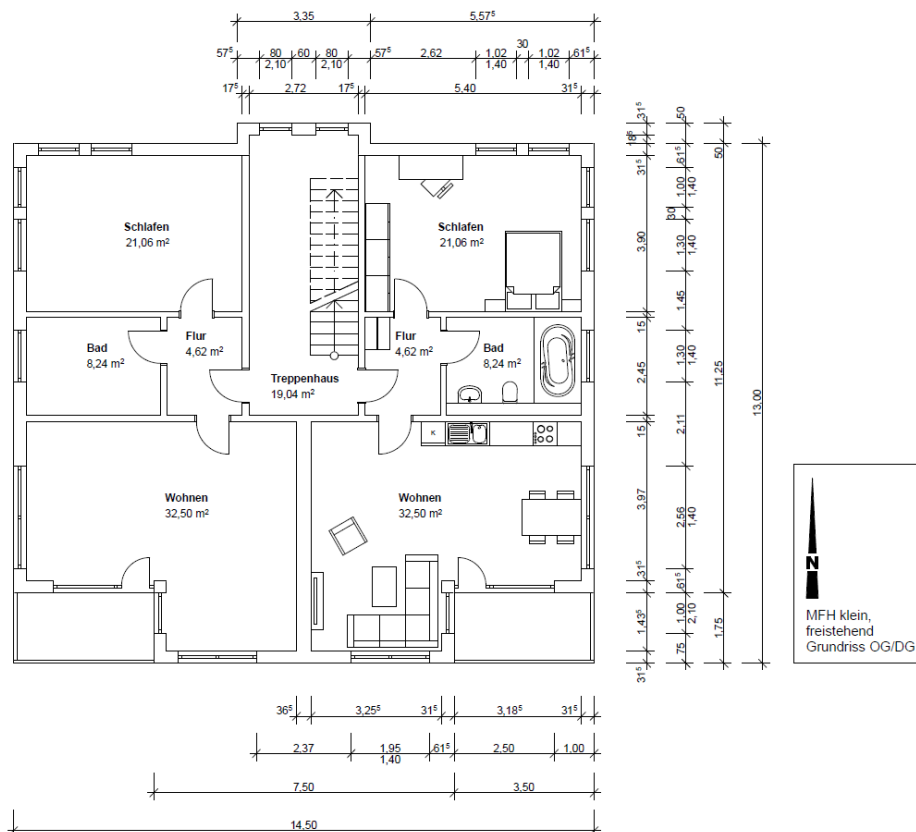
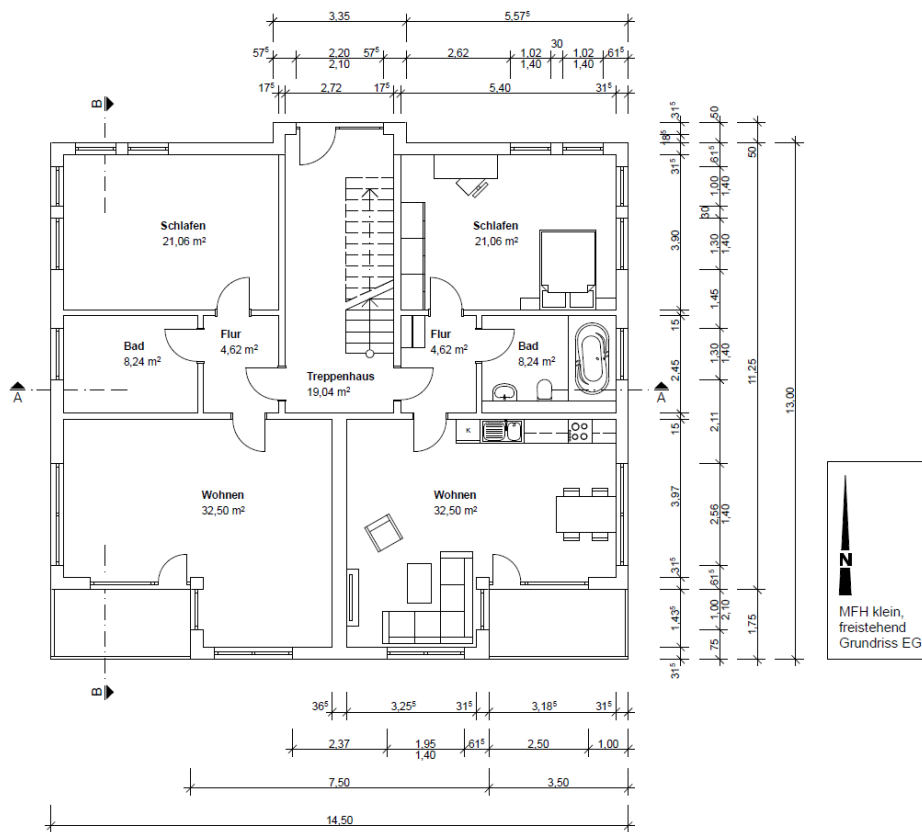
Zone Bad		Volumen [m ³]
		20,20
Bauteil	Fläche [m ²]*	Orientierung
Außenwand, brutto	6,00	Osten/Westen
Fenster	1,82	Osten/Westen
Außenwand, netto	4,18	Osten/Westen
		angrenzend an Zone
Innenwand	8,24	Schlafen
Innenwand	8,24	Wohnen
Innenwand, brutto	4,11	Flur
Tür	1,89	Flur
Innenwand, netto	2,22	Flur
Fußboden	8,24	
Decke	8,24	

*Innenmaße

Zone Flur		Volumen [m ³]
		11,31
Bauteil	Fläche [m ²]*	angrenzend an Zone
Innenwand	4,61	Schlafen
Tür	1,89	Schlafen
Innenwand, netto	2,72	Schlafen
Innenwand	6,00	Bad
Tür	1,89	Bad
Innenwand, netto	4,11	Bad
Innenwand	4,61	Wohnen
Tür	1,89	Wohnen
Innenwand, netto	2,72	Wohnen
Innenwand, brutto	6,00	Treppenhaus
Tür	1,89	Treppenhaus
Innenwand, netto	4,11	Treppenhaus
Fußboden	4,62	
Decke	4,62	

*Innenmaße

Anhang B.2 Grundrisse des Mehrfamilienhauses



Anhang B.3 Schnitte des Mehrfamilienhauses



Anhang C Bauteilaufbauten

Anhang C.1 Bauteilaufbauten leichte Bauart

Innenliegende Bauteile							
Bauteilschichten	d	d _{wirk}	λ	ρ	c _p	R	
	[m]	[m]	[W/(m·K)]	[kg/m ³]	[kJ/(kg·K)]	[(m ² ·K)/W]	
Fußboden_L						R _{si}	0,17
Kunststoffbelag	0,004	0,004	0,23	1.500,00	1,50	R ₁	0,017
Zementestrich	0,06	0,06	1,40	2.000,00	0,85	R ₂	0,043
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	1,000
Beton	0,18	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₄	0,086
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₅	1,000
Akustikplatte	0,02	0	0,06	400,00	0,84	R ₆	0,333
						R _{se}	0,170
						R _{ges} =	2,819
						U =	0,36
Decke_L						R _{si}	0,10
Akustikplatte	0,02	0	0,06	400,00	0,84	R ₁	0,333
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₂	1,000
Beton	0,18	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₃	0,086
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₄	1,000
Zementestrich	0,06	0	1,40	2.000,00	0,85	R ₅	0,043
Kunststoffbelag	0,004	0	0,23	1.500,00	1,50	R ₆	0,017
						R _{se}	0,10
						R _{ges} =	2,679
						U =	0,37
Innenwand (bauartunabhängig)						R _{si}	0,13
Gipskartonplatte	0,0125	0,0125	0,25	800,00	0,85	R ₁	0,050
Dämmschicht WLG 040	0,125	0	0,04	50,00	0,85	R ₂	3,125
Gipskartonplatte	0,0125	0	0,25	800,00	0,85	R ₃	0,050
						R _{se}	0,130
						R _{ges} =	3,49
						U =	0,287
Wohnungstrennwand_L						R _{si}	0,13
Innenputz	0,015	0,015	0,70	1.400,00	0,85	R ₁	0,021
Porenbeton	0,115	0,085	0,16	500,00	1,00	R ₂	0,719
Dämmschicht WLG 040	0,105	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	2,625
Porenbeton	0,115	0	0,16	500,00	1,00	R ₄	0,719
Innenputz	0,015	0	0,70	1.400,00	0,85	R ₅	0,021
						R _{se}	0,13
						R _{ges} =	4,235
						U =	0,24

Anhang C Bauteilaufbauten

Außenbauteile							
Bauteilschichten	d	d _{wirk}	λ	ρ	c _p	R	
	[m]	[m]	[W/(m·K)]	[kg/m³]	[kJ/(kg·K)]	[(m²·K)/W]	
Außenwand_L_Typ1						R _{si}	0,13
Leichtputz	0,015	0,015	0,25	700,00	0,85	R ₁	0,060
Porenbeton	0,175	0,085	0,16	500,00	1,00	R ₂	1,094
Dämmschicht WLG 040	0,1465	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	3,661
Außenputz	0,015	0	1,00	1.800,00	0,85	R ₄	0,015
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	5,000
						U =	0,20
Außenwand_L_Typ 2						R _{si}	0,13
Leichtputz	0,015	0,015	0,25	700,00	0,85	R ₁	0,060
Porenbeton	0,175	0,085	0,16	500,00	1,00	R ₂	1,094
Dämmschicht WLG 035	0,1719	0	0,035	50,00	0,85	R ₃	4,911
Außenputz	0,015	0	1,00	1.800,00	0,85	R ₄	0,015
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	6,250
						U =	0,16
Außenwand_L_Typ 3						R _{si}	0,13
Leichtputz	0,015	0,015	0,25	700,00	0,85	R ₁	0,060
Porenbeton	0,175	0,085	0,16	500,00	1,00	R ₂	1,094
Dämmschicht WLG 030	0,2098	0	0,03	50,00	0,85	R ₃	6,995
Außenputz	0,015	0	1,00	1.800,00	0,85	R ₄	0,015
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	8,333
						U =	0,12
Außenwand_L_Typ 4						R _{si}	0,13
Leichtputz	0,015	0,015	0,25	700,00	0,85	R ₁	0,060
Porenbeton	0,175	0,085	0,16	500,00	1,00	R ₂	1,094
Dämmschicht WLG 040	0,1131	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	2,828
Außenputz	0,015	0	1,00	1.800,00	0,85	R ₄	0,015
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	4,167
						U =	0,24
Dach_L						R _{si}	0,10
Akustikplatte	0,02	0	0,06	400,00	0,84	R ₁	0,333
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₂	1,000
Beton	0,180	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₃	0,086
Dämmschicht WLG 040	0,1869	0	0,04	50,00	0,85	R ₄	4,674
Bitumenbahn	0,004	0	0,23	1.100,00	1,00	R ₅	0,017
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	6,250
						U =	0,16

Anhang C.2 Bauteilaufbauten mittlere Bauart

Innenliegende Bauteile							
Bauteilschichten	d	d _{wirk}	λ	ρ	c _p	R	
	[m]	[m]	[W/(m·K)]	[kg/m ³]	[kJ/(kg·K)]	[(m ² ·K)/W]	
Fußboden_M						R _{si}	0,17
Kunststoffbelag	0,004	0,004	0,23	1.500,00	1,50	R ₁	0,017
Zementestrich	0,06	0,06	1,40	2.000,00	0,85	R ₂	0,043
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	1,000
Beton	0,18	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₄	0,086
Innenputz	0,015	0	0,70	1.400,00	0,85	R ₅	0,021
						R _{se}	0,170
						R _{ges} =	1,507
						U =	0,66
Decke_M						R _{si}	0,10
Innenputz	0,015	0,015	0,70	1.400,00	0,85	R ₂	0,021
Beton	0,18	0,085	2,10	2.400,00	0,85	R ₃	0,086
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₄	1,000
Zementestrich	0,06	0	1,40	2.000,00	0,85	R ₅	0,043
Kunststoffbelag	0,004	0	0,23	1.500,00	1,50	R ₆	0,017
						R _{se}	0,10
						R _{ges} =	1,367
						U =	0,73
Innenwand (bauartunabhängig)						R _{si}	0,13
Gipskartonplatte	0,0125	0,0125	0,25	800,00	0,85	R ₁	0,050
Dämmschicht WLG 040	0,125	0	0,04	50,00	0,85	R ₂	3,125
Gipskartonplatte	0,0125	0	0,25	800,00	0,85	R ₃	0,050
						R _{se}	0,130
						R _{ges} =	3,49
						U =	0,287
Wohnungstrennwand_M						R _{si}	0,13
Innenputz	0,015	0,015	0,70	1.400,00	0,85	R ₁	0,021
Porenbeton	0,115	0,085	0,16	500,00	1,00	R ₂	0,719
Dämmschicht WLG 040	0,105	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	2,625
Porenbeton	0,115	0	0,16	500,00	1,00	R ₄	0,719
Innenputz	0,015	0	0,70	1.400,00	0,85	R ₅	0,021
						R _{se}	0,13
						R _{ges} =	4,235
						U =	0,24

Anhang C Bauteilaufbauten

Außenbauteile							
Bauteilschichten	d	d _{wirk}	λ	ρ	c _p	R	
	[m]	[m]	[W/(m·K)]	[kg/m ³]	[kJ/(kg·K)]	[(m ² ·K)/W]	
Außenwand_M_Typ1						R _{si}	0,13
Wärmedämmputz	0,015	0	0,08	200,00	0,85	R ₁	0,188
Porenbeton	0,175	0	0,16	500,00	1,00	R ₂	1,094
Dämmschicht WLG 040	0,1414	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	3,534
Außenputz	0,015	0	1,00	1.800,00	0,85	R ₄	0,015
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	5,000
						U =	0,20
Außenwand_M_Typ 2						R _{si}	0,13
Wärmedämmputz	0,015	0	0,08	200,00	0,85	R ₁	0,188
Porenbeton	0,175	0	0,16	500,00	1,00	R ₂	1,094
Dämmschicht WLG 035	0,1674	0	0,035	50,00	0,85	R ₃	4,784
Außenputz	0,015	0	1,00	1.800,00	0,85	R ₄	0,015
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	6,250
						U =	0,16
Außenwand_M_Typ 3						R _{si}	0,13
Wärmedämmputz	0,015	0	0,08	200,00	0,85	R ₁	0,188
Porenbeton	0,175	0	0,16	500,00	1,00	R ₂	1,094
Dämmschicht WLG 030	0,206	0	0,03	50,00	0,85	R ₃	6,867
Außenputz	0,015	0	1,00	1.800,00	0,85	R ₄	0,015
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	8,333
						U =	0,12
Außenwand_M_Typ 4						R _{si}	0,13
Wärmedämmputz	0,015	0	0,08	200,00	0,85	R ₁	0,188
Porenbeton	0,175	0	0,16	500,00	1,00	R ₂	1,094
Dämmschicht WLG 040	0,108	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	2,700
Außenputz	0,015	0	1,00	1.800,00	0,85	R ₄	0,015
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	4,167
						U =	0,24
Dach_M						R _{si}	0,10
Innenputz	0,015	0,015	0,70	1.400,00	0,85	R ₂	1,000
Beton	0,180	0,085	2,10	2.400,00	0,85	R ₃	0,086
Dämmschicht WLG 040	0,2394	0	0,04	50,00	0,85	R ₄	4,674
Bitumenbahn	0,004	0	0,23	1.100,00	1,00	R ₅	0,017
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	6,250
						U =	0,16

Anhang C.3 Bauteilaufbauten schwere Bauart

Innenliegende Bauteile							
Bauteilschichten	d	d _{wirk}	λ	ρ	c _p	R	
	[m]	[m]	[W/(m·K)]	[kg/m ³]	[kJ/(kg·K)]	[(m ² ·K)/W]	
Fußboden_S						R _{si}	0,17
Kunststoffbelag	0,004	0,004	0,23	1.500,00	1,50	R ₁	0,017
Zementestrich	0,06	0,06	1,40	2.000,00	0,85	R ₂	0,043
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	1,000
Beton	0,18	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₄	0,086
Leichtputz	0,015	0	0,25	700,00	0,85	R ₅	0,060
						R _{se}	0,170
						R _{ges} =	1,546
						U =	0,65
Decke_S						R _{si}	0,10
Leichtputz	0,015	0,015	0,25	700,00	0,85	R ₂	0,060
Beton	0,18	0,085	2,10	2.400,00	0,85	R ₃	0,086
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₄	1,000
Zementestrich	0,06	0	1,40	2.000,00	0,85	R ₅	0,043
Kunststoffbelag	0,004	0	0,23	1.500,00	1,50	R ₆	0,017
						R _{se}	0,10
						R _{ges} =	1,406
						U =	0,71
Innenwand (bauartunabhängig)						R _{si}	0,13
Gipskartonplatte	0,0125	0,0125	0,25	800,00	0,85	R ₁	0,050
Dämmschicht WLG 040	0,125	0	0,04	50,00	0,85	R ₂	3,125
Gipskartonplatte	0,0125	0	0,25	800,00	0,85	R ₃	0,050
						R _{se}	0,130
						R _{ges} =	3,49
						U =	0,287
Wohnungstrennwand_S						R _{si}	0,13
Leichtputz	0,015	0,015	0,25	700,00	0,85	R ₁	0,060
Kalksandstein	0,115	0,085	0,99	1.800,00	1,00	R ₂	0,116
Dämmschicht WLG 040	0,105	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	2,625
Kalksandstein	0,115	0	0,99	1.800,00	1,00	R ₄	0,116
Leichtputz	0,015	0	0,25	700,00	0,85	R ₅	0,060
						R _{se}	0,13
						R _{ges} =	3,107
						U =	0,32

Anhang C Bauteilaufbauten

Außenbauteile							
Bauteilschichten	d	d _{wirk}	λ	ρ	c _p	R	
	[m]	[m]	[W/(m·K)]	[kg/m³]	[kJ/(kg·K)]	[(m²·K)/W]	
Außenwand_S_Typ1						R _{si}	0,13
Leichtputz	0,015	0,015	0,25	700,00	0,85	R ₁	0,060
Kalksandstein	0,175	0,085	0,99	1.800,00	1,00	R ₂	0,177
Dämmschicht WLG 040	0,183	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	4,578
Außenputz	0,015	0	1,00	1.800,00	0,85	R ₄	0,015
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	5,000
						U =	0,20
Außenwand_S_Typ 2						R _{si}	0,13
Leichtputz	0,015	0,015	0,25	700,00	0,85	R ₁	0,060
Kalksandstein	0,175	0,085	0,99	1.800,00	1,00	R ₂	0,177
Dämmschicht WLG 035	0,204	0	0,035	50,00	0,85	R ₃	5,828
Außenputz	0,015	0	1,00	1.800,00	0,85	R ₄	0,015
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	6,250
						U =	0,16
Außenwand_S_Typ 3						R _{si}	0,13
Leichtputz	0,015	0,015	0,25	700,00	0,85	R ₁	0,060
Kalksandstein	0,175	0,085	0,99	1.800,00	1,00	R ₂	0,177
Dämmschicht WLG 030	0,237	0	0,03	50,00	0,85	R ₃	7,912
Außenputz	0,015	0	1,00	1.800,00	0,85	R ₄	0,015
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	8,333
						U =	0,12
Außenwand_S_Typ 4						R _{si}	0,13
Leichtputz	0,015	0,015	0,25	700,00	0,85	R ₁	0,060
Kalksandstein	0,175	0,085	0,99	1.800,00	1,00	R ₂	0,177
Dämmschicht WLG 040	0,150	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	3,745
Außenputz	0,015	0	1,00	1.800,00	0,85	R ₄	0,015
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	4,167
						U =	0,24
Dach_S						R _{si}	0,10
Leichtputz	0,015	0,015	0,25	700,00	0,85	R ₂	0,060
Beton	0,180	0,085	2,10	2.400,00	0,85	R ₃	0,086
Dämmschicht WLG 040	0,238	0	0,04	50,00	0,85	R ₄	5,947
Bitumenbahn	0,004	0	0,23	1.100,00	1,00	R ₅	0,017
						R _{se}	0,04
						R _{ges} =	6,250
						U =	0,16

Anhang C.4 Kellerbauteile (bauartunabhängig)

Bauteilschichten	d	d _{wirk}	λ	ρ	c _p	R	
	[m]	[m]	[W/(m·K)]	[kg/m ³]	[kJ/(kg·K)]	[(m ² ·K)/W]	
Kellerdecke_Typ 1						R _{si}	0,17
Kunststoffbelag	0,004	0,004	0,23	1.500,00	1,50	R ₁	0,017
Zementestrich	0,06	0,06	1,40	2.000,00	0,85	R ₂	0,043
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	1,000
Beton	0,18	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₄	0,086
Dämmschicht WLG 040	0,1072	0	0,04	50,00	0,85	R ₅	2,681
						R _{se}	0,17
						R _{ges} =	4,167
						U =	0,24
Kellerdecke_Typ 2						R _{si}	0,17
Kunststoffbelag	0,004	0,004	0,23	1.500,00	1,50	R ₁	0,017
Zementestrich	0,06	0,06	1,40	2.000,00	0,85	R ₂	0,043
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	1,000
Beton	0,18	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₄	0,086
Dämmschicht WLG 040	0,1628	0	0,04	50,00	0,85	R ₅	4,070
						R _{se}	0,17
						R _{ges} =	5,556
						U =	0,18
Kellerdecke_Typ 3 (ungedämmt)						R _{si}	0,17
Kunststoffbelag	0,004	0,004	0,23	1.500,00	1,50	R ₁	0,017
Zementestrich	0,06	0,06	1,40	2.000,00	0,85	R ₂	0,043
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	1,000
Beton	0,18	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₄	0,086
Innenputz	0,015	0	0,7	1.400,00	0,85	R ₅	0,021
						R _{se}	0,17
						R _{ges} =	1,507
						U =	0,66

Anhang C Bauteilaufbauten

Bauteilschichten	d	d _{wirk}	λ	ρ	c _p	R	
	[m]	[m]	[W/(m·K)]	[kg/m ³]	[kJ/(kg·K)]	[(m ² ·K)/W]	
Bodenplatte_Typ 1 (unterseitig gedämmt)						R _{si}	0,17
Zementestrich	0,06	0,06	1,40	2.000,00	0,85	R ₂	0,043
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	1,000
Beton	0,40	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₄	0,190
Dämmschicht WLG 040	0,1105	0	0,04	50,00	0,85	R ₅	2,763
						R _{se}	0,0
						R _{ges} =	4,167
						U =	0,24
Bodenplatte_Typ 2 (unterseitig gedämmt)						R _{si}	0,17
Zementestrich	0,06	0,06	1,40	2.000,00	0,85	R ₂	0,043
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	1,000
Beton	0,40	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₄	0,190
Dämmschicht WLG 040	0,1661	0	0,04	50,00	0,85	R ₅	4,152
						R _{se}	0,0
						R _{ges} =	5,556
						U =	0,18
Bodenplatte_Typ 3 (oberseitig gedämmt)						R _{si}	0,17
Zementestrich	0,06	0,06	1,40	2.000,00	0,85	R ₂	0,043
Dämmschicht WLG 040	0,1505	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	3,763
Beton	0,40	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₄	0,190
						R _{se}	0,0
						R _{ges} =	4,167
						U =	0,24
Bodenplatte_Typ 4 (oberseitig gedämmt)						R _{si}	0,17
Zementestrich	0,06	0,06	1,40	2.000,00	0,85	R ₂	0,043
Dämmschicht WLG 040	0,2061	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	5,152
Beton	0,40	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₄	0,190
						R _{se}	0,0
						R _{ges} =	5,556
						U =	0,18
Bodenplatte_Typ 5 (ungedämmt)						R _{si}	0,17
Zementestrich	0,06	0,06	1,40	2.000,00	0,85	R ₂	0,043
Dämmschicht WLG 040	0,04	0	0,04	50,00	0,85	R ₃	3,868
Beton	0,40	0	2,10	2.400,00	0,85	R ₄	0,190
						R _{se}	0,0
						R _{ges} =	1,403
						U =	0,71

ISBN 978-3-7376-0854-1



Die passive Kühlung umfasst Systeme, bei denen Energie ausschließlich zur Förderung des Kühlmediums benötigt wird, wie beispielsweise thermisch aktivierte Bauteile kombiniert mit einer Kühlung über das Erdreich oder Systeme mit Kühlung über indirekte Verdunstung. Diese Kühlsysteme bieten das Potenzial, behagliche Innentemperaturen zu schaffen, ohne einen hohen elektrischen Energiebedarf zu verursachen und stellen somit einen umweltfreundlichen Umgang mit anhaltenden Hitzeperioden dar.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur Bewertung passiver Kühlsysteme. Neben der grundsätzlichen Funktionsweise werden die Möglichkeiten und Grenzen solcher Systeme aufgezeigt. Darüber hinaus wird das System der Sohlplattenkühlung einer Parameterstudie mithilfe der Simulationsumgebung TRNSYS unterzogen. Mit Blick auf den sommerlichen Wärmeschutz, den thermischen Komfort und die Energieeffizienz fließen die Erkenntnisse in eine Zusammenstellung von Planungsempfehlungen ein, welche bauliche und anlagentechnische Aspekte beinhalten.