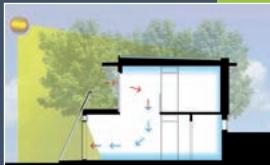


Thomas Duzia, Rainer Mucha

# Energetisch optimiertes Bauen

Technische Vereinfachung –  
nachhaltige Materialien –  
wirtschaftliche Bauweisen



Fraunhofer IRB ■ Verlag

Thomas Duzia, Rainer Mucha

## **Energetisch optimiertes Bauen**



Thomas Duzia, Rainer Mucha

# Energetisch optimiertes Bauen

Technische Vereinfachung –  
nachhaltige Materialien –  
wirtschaftliche Bauweisen

Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9507-0

ISBN (E-Book): 978-3-8167-9508-7

Herstellung: Angelika Schmid

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Satz: Satzpunkt Ursula Ewert GmbH, Bayreuth

Druck: Konrad Tritsch GmbH, Ochsenfurt-Hohestadt

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürfen. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2016

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 9 70-25 00

Telefax +49 7 11 9 70-25 08

irb@irb.fraunhofer.de

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	7
Hintergrund .....	9
<b>1 Energetische Grundlagen .....</b>	<b>11</b>
<b>2 Bautradition .....</b>	<b>19</b>
2.1 Bauen im regionalen Bezug .....	20
<b>3 Umweltwärme – Umweltkälte .....</b>	<b>31</b>
3.1 Klima und regionale Besonderheiten .....	32
3.1.1 Normative klimatische Bedingungen Deutschlands .....	32
3.2 Umweltmeteorologie .....	34
3.3 Globalstrahlung und Strahlungsangebot .....	35
3.3.1 Der Einfluss des Windes .....	38
3.3.2 Sonnenstände und Raumausrichtung .....	40
3.3.3 Trübungs faktoren und solare Gewinne .....	42
3.3.4 Azimut $\beta$ und die Ausrichtung des Bauwerks .....	44
3.4 Geothermie – Erdwärme und Grundwasser .....	46
<b>4 Behaglichkeit, Komfortanspruch und Raumhygiene .....</b>	<b>51</b>
4.1 Oberflächentemperaturen im Innenraum .....	53
4.2 Materialien und Ansätze zur Behaglichkeitsbeurteilung .....	55
<b>5 Grundlagen der Materialeigenschaften .....</b>	<b>61</b>
5.1 Reflexion, Absorption und Albedo .....	62
5.2 Einfluss der Innenwandkonstruktion auf den Wärmefluss .....	65
5.2.1 Wärmegewinne bei opaken Bauteilen .....	67
5.2.2 Wärmedurchgang und Phasenverschiebung .....	70
5.2.3 Wärmegewinne bei transparenten Bauteilen .....	73
5.3 Konstruktionen und Materialeinsatz .....	75
5.3.1 Betonkernaktivierung .....	75
5.3.2 Klimatisierung über Pfahlgründungen .....	83
5.4 Beton und Stahlbeton – energieeffiziente Variationen .....	85
5.4.1 Einsatz von Leichtbeton .....	85
5.4.2 Dämmbeton .....	92

5.5	Ökologische Betrachtungsmöglichkeiten von Baustoffen . . . . .	95
5.5.1	Graue Energie von Baustoffen . . . . .	95
5.5.2	Wartung und Recycle-Fähigkeit . . . . .	99
5.5.3	Lehm und Stroh – Rückgriff auf regionale Baustoffe . . . . .	100
<b>6</b>	<b>Maßnahmen im sommerlichen Wärmeschutz . . . . .</b>	<b>107</b>
6.1	Einflussfaktor Strahlungseintrag . . . . .	112
6.1.1	Strahlungsverhalten von Glasflächen . . . . .	114
6.1.2	Gesamtenergiedurchlassgrad für Verglasungen . . . . .	116
6.2	Einflussfaktoren auf die Wärmeentwicklung im Raum . . . . .	120
6.2.1	Raumgröße (Nettogrundfläche) . . . . .	122
6.2.2	Raumverhältnis und Fenstergrößen (Fensteranteil) . . . . .	123
6.2.3	Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen . . . . .	123
6.3	Sommerliche Wärmeschutzmaßnahmen . . . . .	125
6.3.1	Wirksamkeit von Verschattungsanlagen . . . . .	125
6.3.2	Einbaurahmen von Fensterelementen . . . . .	126
6.3.3	Energiearme Gebäudekühlung und natürliche Ventilation . . . . .	129
6.3.4	Integrative Lüftungskonzepte . . . . .	130
<b>7</b>	<b>Maßnahmen im winterlichen Wärmeschutz . . . . .</b>	<b>133</b>
7.1	Prinzipien des Wandaufbaus . . . . .	134
7.2	Gedämmte Außenbauteile – Wand, Dach, Bodenplatte . . . . .	134
7.3	Potenzial monolithischer Wandkonstruktionen . . . . .	137
7.4	Eigenschaften von begrünten Dächern und Fassaden . . . . .	141
7.5	Dach- und Wandabsorber . . . . .	145
<b>8</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Dämmmaßnahmen . . . . .</b>	<b>155</b>
8.1	Energieeffizienz, Energieerhalt und Energiegewinne . . . . .	155
8.2	Wirtschaftlichkeit und Einsparpotenzial . . . . .	155
<b>9</b>	<b>Perspektiven . . . . .</b>	<b>159</b>
<b>10</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>163</b>
	Literaturverzeichnis . . . . .	163
	Normenverzeichnis . . . . .	165
	Abbildungsverzeichnis . . . . .	166
	Tabellenverzeichnis . . . . .	172
	Stichwortverzeichnis . . . . .	174

## Danksagung

Für die inhaltliche Unterstützung und Übergabe von Unterlagen möchten wir uns bei den Architekten Baumschlager Eberle aus Österreich, Valentina Maini aus Katalonien, Traverso-Vighy aus Padua, Boltshauser Architekten AG aus Zürich, den Arquitectos Martin y Abarca aus Granada sowie TAC Arquitectes aus Barcelona, den Architekten MBA/S aus Stuttgart, der Ingenieurgesellschaft Team für Technik GmbH aus München, der HeidelbergCement AG und dem Industrieverband Polyurethan-Hartschaum bedanken.

Weiterer Dank gilt Institutionen, wie der Universität von Padua, dem Gründach-Verband aus Österreich, dem Pionier des solaren Bauens John Perlin aus Kalifornien, dem Stadtarchiv Wuppertal mit der Unterstützung durch Markus Teubert und Margret Wagner, unseren studentischen Hilfskräften Moritz Haider, Jacqueline Peter, Jasmin Otto, den Korrekturlesenden Birit Fiebig, Karen Wimmel und Tabitha Görz.



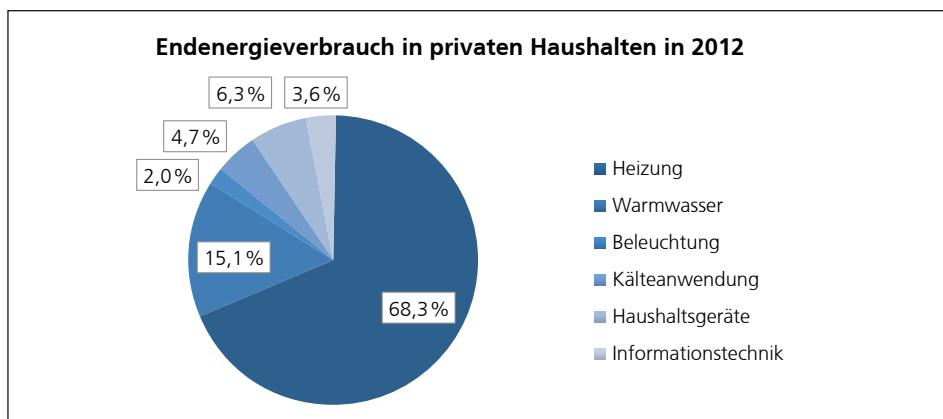
## Hintergrund

Ziel des ökologischen Bauens ist es, umweltfreundliche und energiesparende Gebäude zu realisieren, die schonend mit den natürlichen Ressourcen sowie verantwortungsvoll mit Primärenergien umgehen und gleichzeitig alle Anforderungen an das Wohlbefinden des Menschen erfüllen. Dabei ist grundsätzlich eine optimale Raumkonditionierung unter Nutzung aller zur Verfügung stehenden planerischen Maßnahmen bei gleichzeitigem schonenden Umgang mit den Ressourcen umzusetzen.

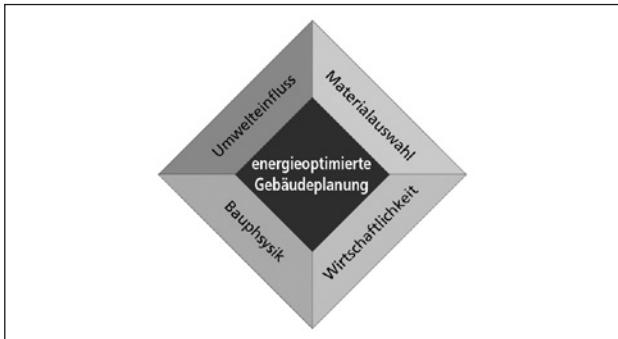
Als 1983 Wolfgang Pehnt das Buch »Das Ende der Zuversicht« veröffentlichte, erschien dies im Kontext einer immer deutlicher werdenden skeptischen Haltung gegenüber der Lebensweise der industriellen Gesellschaft. Die Folgen der Ölrisiken und der Umweltverschmutzung wurden deutlich. Aus diesen Folgen entwickelte sich ein neuer Geist. Man entdeckte die Sonnenenergie wieder und stellte die Reduzierung des Energieverbrauchs in den Mittelpunkt von ökonomischen und ökologischen Betrachtungen. Im Nachhinein betrachtet stellte dieses Ende der Zuversicht jedoch nicht wirklich das Ende der modernen Architektur dar. Auch heute und damit 30 Jahre später steht das energetische Bauen stärker denn je im Mittelpunkt der Planung. Aufgrund einer ganzheitlichen Betrachtungsweise sind nicht nur die Verbrauchswerte im Betrieb eines Gebäudes von Interesse. Ebenso muss der Energieaufwand vom Abbau der Ressource, über die Produktion und Lieferung auf die Baustelle, wie auch die Recyclingfähigkeit betrachtet werden.

Folgt man heute den aktuellen technophilen Visionen der Anbieter von Telekommunikations- und Steuerungstechnik, so soll das Wohnen zukünftig ein individuelles Smart-Steuern und Programmieren aller technischen Komponenten eines Gebäudes sein. Häuser sollen intelligent und bedarfsgerecht den Energieverbrauch senken. Damit begibt man sich zugleich in die Abhängigkeit einer Technik, die zusätzliche Kosten für Installation und Wartung nach sich ziehen wird.

Eine Umfrage des Instituts für Demoskopie Allensbach ging der Frage nach, ob sich die Nutzer über technische Geräte ärgern, weil sie unnötig kompliziert sind? Von den



**Abb. 1:** Der Endenergieverbrauch in privaten Haushalten in Deutschland in 2012 ohne KFZ-Nutzung  
(Quelle: BDEW)



**Abb. 2:** Einflussfaktoren auf die energieoptimierte Gebäudeplanung

8000 Befragten antworteten 16 %, dass sie sich noch nie über die Technik geärgert hätten. Bis auf 2 % der Befragten, die sich zu der Frage nicht äußerten, entfiel auf den Rest von 82 % eine Bejahung der Verärgerung mit unterschiedlich tiefer Ausprägung.<sup>1</sup>

Die fortschreitende Tendenz, die technische Gebäudeausstattung immer aufwendiger auszuführen, erscheint wie eine zeitliche Verzögerung von dem, was die Automobilindustrie schon lange vollzogen hat. Was regelmäßig als Innovation gefeiert wird, sorgt nun dafür, dass die Wartung an Fahrzeugen nur noch von spezialisierten Betrieben übernommen werden kann, die über die notwendige Auslesetechnik verfügen. An diesem Punkt kommt der schon 1974 von Burckhardt formulierte Anspruch ins Spiel, dass es darauf ankommt haustechnische Installationen zu entwickeln, die nicht nur das Klempner- und Elektrohandwerk bereichern. Vielmehr muss es darauf ankommen, Installationen zu entwickeln, die selbst auf eine einfache Weise von den Nutzern selbst gewartet und repariert werden können.<sup>2</sup>

Um eine energetisch optimierte Gebäudeplanung innerhalb des Planungsprozesses zu realisieren und alle Faktoren über die Nutzungsdauer zu berücksichtigen, ist ein ganzheitliches Wissen über den Gebäudeentwurf, die Konzeption der technischen Gebäudeausstattung und die bauphysikalischen und materialtechnischen Eigenschaften notwendig. Hinzu kommen Betrachtungen und Auslegungen zum Bedarf an Ressource und den Energieaufwand zur Erzeugung, zur Nutzung und Recyclingfähigkeit von Gebäuden und Konstruktionen.

Bedingt durch diese Vielzahl an Einflüssen kann kein pauschaler Richtwert mehr für die ökologische und ökonomische Effizienz eines Gebäudes angegeben werden. Aufgrund der Einzigartigkeit und Besonderheit muss jedes Gebäude vielmehr gesondert betrachtet werden. Die Abbildung 2 stellt schematisch die vier wesentlichen Einflussfaktoren dar, die in einer frühen Phase in den Planungsprozess einfließen müssen.

Der Aufbau des vorliegenden Buches ist daher in die Themenbereiche Klima, Behaglichkeit, Materialeigenschaften und Konstruktionsweisen und die Folgen im winterlichen wie sommerlichen Wärmeschutz unterteilt. Für eine energieoptimierte Gebäudeplanung sind Kenntnisse in allen Bereichen notwendig, um die richtigen Schlüsse im Planungsalltag ziehen zu können.

1 vgl. Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, 19. Oktober 2014, Nr. 42, S.19

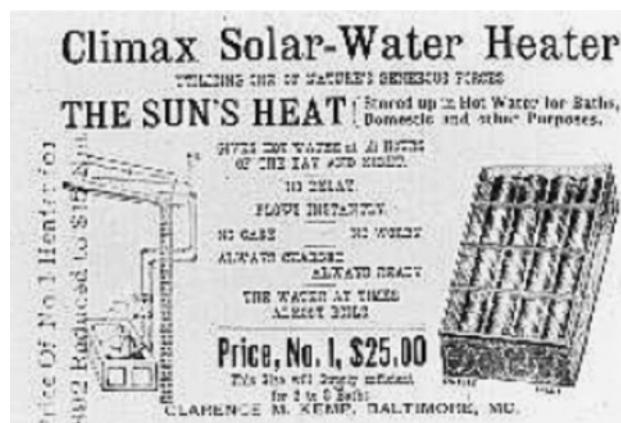
2 vgl. [8], S. 179

# 1 Energetische Grundlagen

Seit jeher ist die wesentliche Aufgabe aller Gebäude den Einfluss der äußeren Bedingungen auf das Leben im Inneren einzuschränken und für ausgewogene klimatische Verhältnisse zu sorgen. Mit diesen Anforderungen standen immer die auf den Menschen bezogenen Behaglichkeitskriterien und Ansprüche an die Wohnraumhygiene im Vordergrund. Mit dem modernen Bauen entwickelte sich das Klimadesign, das unter Zuhilfenahme der Bauphysik vorhersehbare und akzeptable Lebensbedingungen schafft. Dieses grundsätzliche Anliegen wurde in den vergangenen Jahrzehnten erweitert, um energetische Anforderungen und dem Anspruch ressourceneffizient und nachhaltig zu leben und zu bauen gerecht zu werden. Damit rückten die stofflichen Eigenschaften von Baustoffen in das allgemeine Interesse. Insbesondere war dies der Fall, wenn es sich um Schadstoffe handelte. Aber auch die Bilanzierung des energetischen Aufwandes zur Herstellung und Recycling von Materialien rückte weiter in den Fokus des Interesses. Dazu kamen neue Betrachtungsweisen zum Lebenszyklus, die erkannten, dass der Unterhalt und die Pflege die treibenden Kostenfaktoren nach der Errichtung eines Gebäudes sind, und die zwingend bewertet werden müssen, um einen optimalen Betrieb und die Einhaltung von Wartungsintervallen sicherzustellen. Neben den aktiven Maßnahmen die Gebäudetechnik zu optimieren und Energieverbräuche zu reduzieren, folgte zwangsläufig die Anforderung, vorhandene Umweltenergien in die Gebäudekonzeption mit einzubeziehen. Aus diesem Anspruch folgt, dass Gebäudeausrichtung und Material viel deutlicher auf diese Anforderungen hin ausgewählt und konzipiert werden müssen. Neben der Reduzierung des Energiebedarfs, stehen die Varianten der Nutzung solarer Energie oder der Geothermie im Mittelpunkt der Planung.

Dass die Nutzung von Sonnenenergie im Grunde nichts Neues ist, zeigt der Blick in die Geschichte. Die Auseinandersetzung mit der Sonne stand schon immer im Zentrum des kulturellen Schaffens aller Kulturen. Ebenso waren aber auch die regionalen Besonderheiten des Klimas stilprägend. Diese grundlegenden klimatischen Vorgaben finden sich als konstruktive Reaktion in vielen traditionellen Bauformen wider. Bauen war immer

**Abb. 3:** Zeitungsanzeige des  
Climax Solar-Water Heater  
(Quelle: John Perlin, University  
of California)





**Abb. 4:** Südansicht des Solar Hemicycle House (Jacob II House) von Frank Lloyd Wright in Middleton/Wisconsin  
(Quelle: Thomas Yanul)

eine Folge der regionalen Gegebenheiten, die geprägt waren durch die zur Verfügung stehenden Baustoffe und die klimatischen Verhältnisse.

Daneben entwickelten sich jedoch auch naturkundlich geprägte Entdeckungen, die auf den ersten Blick noch keinen Bezug zur baulichen Anwendung im Blick hatten. Unter allen Beispielen zur Nutzung solarer Energie erscheint diesbezüglich die Entwicklung des Schweizer Naturforschers Horace-Bénédict de Saussure (1740–1799) in einem besonderen Licht. Auf seinen Expeditionen zur Erkundung der Alpen nutzte er schon 1767 eine von Glasplatten abgedeckte Holzkiste als Sonnenkollektor, um Essen zu erwärmen. Erst 1891 folgte dann die erste Nutzung der Kollektorentechnik nach diesem Prinzip zur Erwärmung von Brauchwasser im häuslichen Bereich. Clarence Kemp entwickelte den »Climax Solar-Water Heater«.

Wurde dadurch vielleicht der Beginn des solaren Zeitalters eingeläutet? Es folgten Entwicklungen, die die Sonnenenergie verstärkt in den Baubereich, insbesondere für die Wohnnutzung, einbanden. Mit diesen Entwicklungen setzte aber zugleich auch eine weitere Technisierung in Gebäuden ein, um solare Wärme mittels Kollektoren in ein ganzheitliches Gebäudekonzept zur Heizung- und Warmwassererzeugung zu nutzen. Damit stellte sich zugleich die Frage wie viel Technik braucht der Mensch zum Wohnen?

Folgt man den seit Jahren immer wieder publizierten Ideen des Smart Home, dann entsteht der Eindruck, dass die Konzepte eher zu einem technikfreundlichen »more is more« tendieren, und es scheint nur eine Frage der Zeit zu sein, wann sämtliche Nutzer-, Lebens- und Gebäudeeigenschaften mittels Sensoren erfasst werden. Die Frage ist nur: Braucht man tatsächlich so viel Technik, um in einem Gebäude ressourcenschonend und behaglich leben zu können? Ist es nicht sinnvoller, ein wartungsarmes und einfach konstruiertes Gebäude zu unterhalten bei dem ein vollständiges Recycling möglich ist? Damit ist man mitten in der Debatte zur Nachhaltigkeit von Bauwerken, bei der nicht nur der Jahresprimärenergiebedarf, wie es die Energieeinsparverordnung fordert, betrachtet wird, sondern auch Aspekte der Erstellung, des Lebenszyklus und der Entsorgung in Einklang zu bringen sind.

Auch hier könnte sich noch einmal ein Blick in die Baugeschichte lohnen. Ein vielzitiertes Beispiel stellt dabei das Wohnhaus nach Sokrates dar, das als Sonnenfalle im Winter funktioniert, dafür in den Sommermonaten durch konstruktive Maßnahmen die

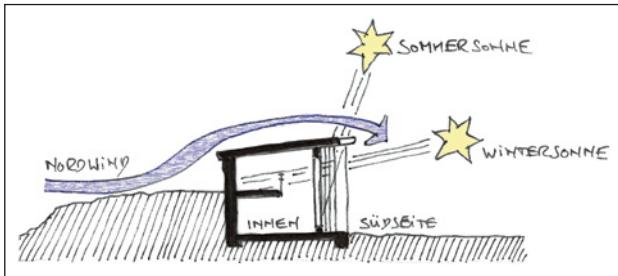
**Abb. 5:** Ansicht der geschlossenen und in den Erdhügel eingelassenen Nordseite des Solar Hemicycle House (Quelle: Thomas Yanul)



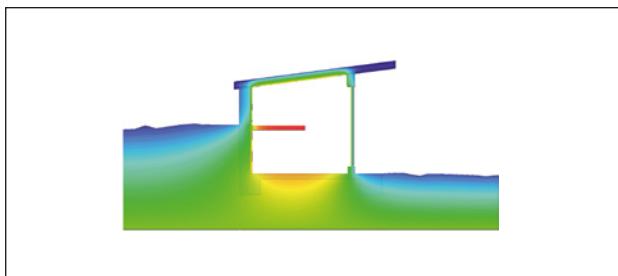
direkte Einstrahlung reduziert, um eine zu hohe Erwärmung des Innenraums auszuschließen. Verknüpft wird dies mit wärmespeichernden Eigenschaften von Wand und Boden und einer differenzierten Geometrie des Bauwerks. Das Gebäude öffnet sich über eine relativ große südorientierte Fläche und maximiert damit die solaren Erträge. Im Umkehrschluss wird die Nordseite dagegen bewusst klein gehalten. Hier sind keine solaren Wärmegewinne zu erwarten und hier liegen eigentlich nur Transmissionswärmeverluste vor. Einfache konstruktive Maßnahmen zeigten hier bereits einen Weg, der die Energieeffizienz und Nutzung von solarer Energie in sich trägt.

In Analogie zu dem einfachen, Sokrates zugeschriebenen Konzept, kann das »Solar Hemicycle« Haus gesehen werden, das Frank Lloyd Wright für die Familie Jacobs zwischen 1944 und 1948 in Middleton/Wisconsin plante. Wie der Name des Gebäudes besagt, wählte Frank Lloyd Wright einen halbkreisförmigen Grundriss. Als Reaktion auf das in Middleton vorherrschende Klima schuf Frank Lloyd Wright ein Wohnhaus, das differenziert auf die Sonnenstände und Windbedingungen reagiert. Zum Süden öffnet sich das Gebäude über eine zweigeschossige Glasfassade zur Landschaft. Hier wirkt die Struktur mit der Glasfassade wie eine Sonnenfalle für die winterlichen Sonnenstände. Um jedoch der Überhitzung in den Sommermonaten vorzubeugen erhielt das Gebäude einen weit auskragenden Dachüberstand, der vor der direkten Sonneneinstrahlung in den Sommermonaten schützt und eine übermäßige Erwärmung des Innenraums verhindert. Der großflächigen verglasten Öffnung zum Süden steht eine grundsätzliche andere und geschlossene Ausführung der Nordseite gegenüber. Um die Innenräume vor hohen Wärmeverlusten zum Norden zu schützen, die auch aus den starken Winden resultieren, wurde der erdgeschossige Wohnbereich zum Norden in einen Erdhügel abgesenkt und tritt nur als eingeschossiges Gebäude in Erscheinung. Damit schützte man nicht nur einen großen Teil des Gebäudes vor dem direkten Windangriff und der daraus resultierenden Abkühlung, sondern man nutzte zugleich die Trägheit des Wärmeübergangs im Erdreich.

Die in Abbildung 6 dargestellte Funktionsweise des Solar Hemicycle House von Frank Lloyd Wright nutzt die Topografie und die Möglichkeit der Sonnenorientierung. Die Nordseite wird zur Reduzierung der Angriffsflächen des Windes in den Hang eingelassen. Dadurch verringern sich die Transmissionswärmeverluste. Der Wohnraum ist zum Süden orientiert und wird mit einer Glaswand abgeschlossen. Weit auskragende Dachüber-



**Abb. 6:** Funktionsprinzip des Solar Hemicycle House von Frank Lloyd Wright



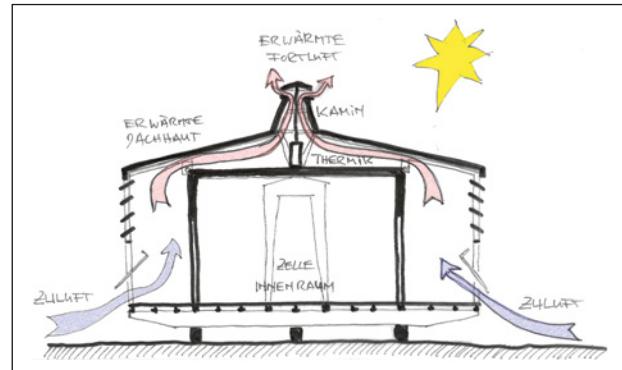
**Abb. 7:** Wärmestromsimulation des Solar Hemicycle House von Frank Lloyd Wright unter stationären Bedingungen

stände verhindern die direkte Sonneneinstrahlung im Sommer, die zur Überhitzung des Innenraums führt. Die Wintersonne gelangt dagegen ungehindert in den Innenraum und kann die massiven Wand- und Bodenflächen erwärmen, die wiederum als Speicher dienen.

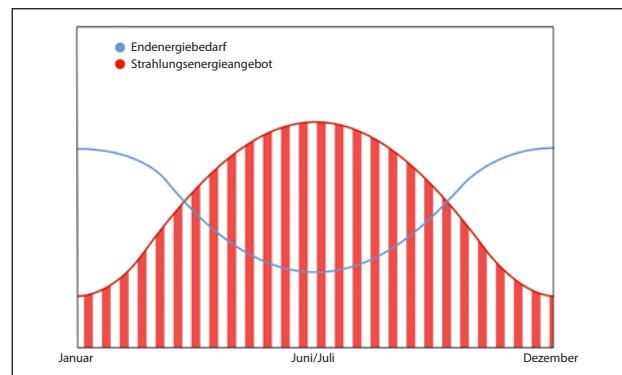
Die Hanglage auf der Nordseite bietet neben dem Windschutz auch einen Temperaturschutz durch den Bodenkontakt des Gebäudes. Dadurch kann die kalte Außenluft nicht die gesamte Wand erreichen und das Erdreich einen Temperaturpuffer bilden. Diese Auswirkung ist in der nachstehenden Wärmesimulation durch den schematischen Schnitt des Gebäudes gut zu erkennen. Die positive Wirkung erstreckt sich daher auf das gesamte Innenklima und stellt so eine natürliche Dämmmaßnahme dar.

Ein ebenso einfaches Konzept zur Nutzung der solaren Einstrahlung entwickelte Félix Trombe zusammen mit Jacques Michel in den 1960er Jahren (siehe Kapitel 5.2.3). Mit einem geringen Abstand stellte Trombe vor eine schwarz gestrichene massive Mauerwerkswand eine Glasscheibe. Die kurzweligen Strahlen der Sonne passierten die Glasscheibe und wurden von der schwarz gestrichenen Wandoberfläche absorbiert und in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt. Auf diese Weise konnte die Wand als Wärmespeicher genutzt werden, der die Wärme zeitverzögert an den Innenraum weitergibt. Zugleich erwärmte sich die Luft in dem Zwischenraum zwischen Glasscheibe und Wand. Über oberseitige Öffnungen in der Wand wurde die Luft direkt in den dahinterliegenden Raum eingeleitet und zur Beheizung genutzt. Um die Thermik im Zwischenraum zu unterstützen, wurden weitere zusätzliche Öffnungen am Fußpunkt der Wand ausgeführt. Durch diese Öffnungen strömte die kühle Luft aus dem Innenraum nach, erwärmte sich, stieg auf und konnte so dem Raum wieder zugeführt werden. Diese Trombe-Wand genannte Konstruktion konnte auch abgewandelt als Solarkamin genutzt werden, der

**Abb. 8:** Systemskizze des 1949 von Jean Prouvé geplanten *Maison tropicale* mit seiner zweischaligen Trennung von Zelle und sonnenbeschie- nener Dachhaut, die die Zelle verschattet und zugleich zu einem kühlenden Kamineffekt führt



**Abb. 9:** Schematische Darstellung der gegenläufigen Jahresgänge von Strahlungsangebot zum häuslichen Endenergiebedarf zur Abnahme von Wärme



die natürliche Thermik aufgrund der Dichteunterschiede in der Luft, selbst an windstille Tagen, nutzt und Wärme erzeugt.

Ein weiteres Projekt, das solare Energien nutzte und thermische Effekte integrierte, war das 1949 von Jean Prouvé entwickelte »Maison tropicale«. Prouvé verfolgte dabei einen anderen Weg, die Energie der Sonne zu nutzen. Bei diesem kleinen Gebäude, das eine Abmessung im zellenartigen Innenraum von 6/12 m hat, diente die Sonne der Erwärmung der Oberflächen und zur Raumkühlung. Die Dachhaut lag, von der Raumzelle thermisch getrennt, hinterlüftet oberhalb des Aufenthaltsbereichs und diente zugleich als Verschattung. Aufgrund der starken Erwärmung der Dachhaut verringerte sich unterhalb der Dachbleche die Dichte der Luft und es entstand eine natürliche Thermik. Diese führte dazu, dass die erwärmte Luft aufstieg und zum kaminartigen First geleitet wurde. Durch die geöffneten Lamellen des vorgelagerten Umgangs strömte die kühlere Zuluft nach.

Die Nutzung solarer Energien ist jedoch letztendlich nicht nur entwurfsabhängig, sondern wird bestimmt von den Bedingungen der Umgebung. Eine Schwierigkeit stellt dabei immer noch der Umstand dar, dass im Sommer die größten solaren Gewinne erzielt werden können, zu diesem Zeitpunkt jedoch der Heizwärmebedarf der Geringste ist und aus einer hohen solaren Exposition ein Kühlbedarf für den Innenraum resultiert.

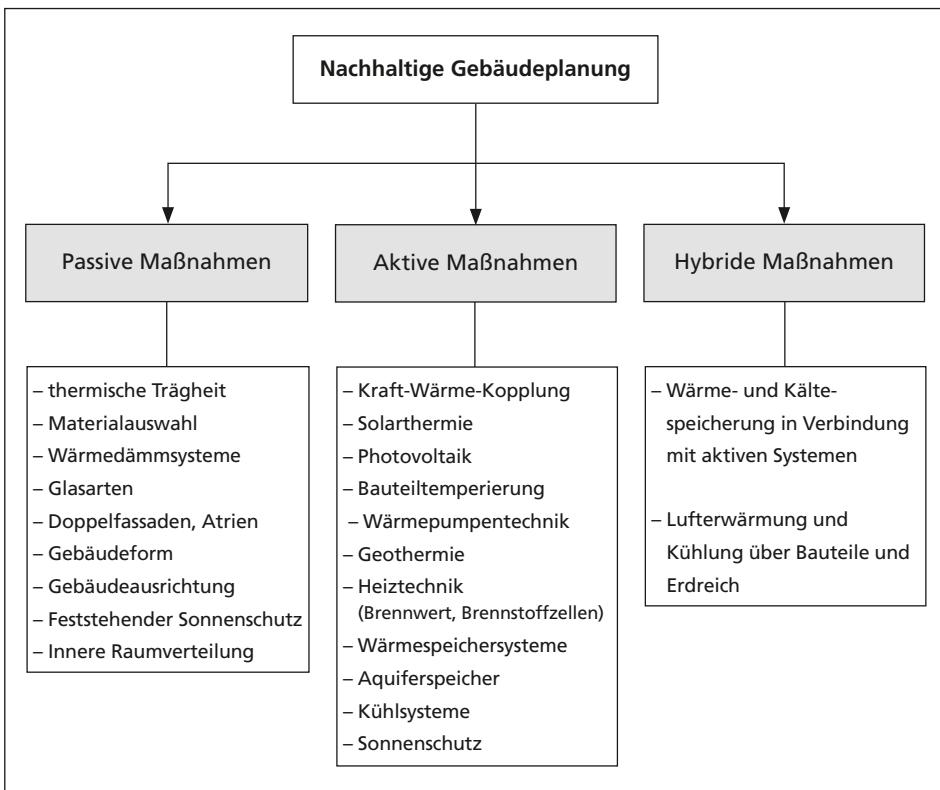


Abb. 10: Aspekte der nachhaltigen Gebäudeplanung

Wo liegen nun die Unterschiede zu den einfachen Entwurfsansätzen der Vergangenheit und den heute üblichen Gebäudekonzeptionen? Besteht heute noch die Möglichkeit ein klimagerechtes und energieoptimiertes Gebäude mit geringer technischer Ausstattung umzusetzen? Tatsächlich haben sich die Anforderungen an die Planung in den vergangenen Jahren deutlich verändert und damit auch die Art und Weise der Konstruktionen. Diese Entwicklung deckt sich u.a. mit einem Phänomen, das Bonk und Anders<sup>3</sup> beschrieben haben. Danach hat sich die Entwicklung der mittleren winterlichen Raumtemperaturen in den letzten dreihundert Jahren kontinuierlich erhöht. Lagen um 1700 die mittleren Raumlufttemperaturen noch zwischen 8°C und 13°C, stiegen sie bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts schon auf einen Bereich von 14°C bis 17°C, um dann zu Beginn des 21. Jahrhunderts eine mittlere Temperatur von ca. 21°C zu erreichen. Daraus scheint ableitbar, dass sich mit den verbesserten baulichen und technischen Möglichkeiten zugleich die Bedürfnisse an die Behaglichkeit änderten und der Bedarf an Heizenergie zwangsläufig ansteigen musste.

Neben den energetischen Aspekten stehen jedoch noch weitere Punkte im Fokus einer ganzheitlichen Betrachtungsweise und integrativen Gebäudeplanung:

3 vgl. [6], S. 11, Abb. 1

- Nutzung recycelter oder erneuerbarer Materialien
- Verwendung von Materialien mit einem geringen Bedarf an Grauer Energie
- Nutzung von Materialien, die im Abbruch leicht fraktionierbar und sortenrein sind
- Materialien, die frei sind von Chemikalien, z. B. Algiziden, Fungiziden, etc.
- Nutzung von heimischen Hölzern aus kontrolliertem Anbau
- Nutzung von Materialien aus regionaler Produktion mit kurzen Lieferwegen
- Verwendung von Grauwasseranlagen im Haushalt
- Reduktion des Flächenverbrauchs und damit der Versiegelung von Oberflächen, zur Verbesserung des städtischen Mikroklimas
- Abschätzung und Bilanzierung der Wartungszyklen und der Haltbarkeit der Baustoffe und Konstruktionen
- Umnutzung von Gebäuden und damit Ressourcenschonung.



## 2 Bautradition

Gebäude stellten traditionell immer einen Reflex auf die vorherrschenden Lebensumstände dar. Diese wurden geprägt von den regionalen Besonderheiten. Dazu kamen handwerkliche Fähigkeiten und die Gabe mit den regional vorhandenen Materialien umzugehen. Dabei standen neben den ökonomischen Zwängen die klimatischen Verhältnisse, geprägt von Sonne, Wind, Regen und Lufttemperatur im Vordergrund.

Besonders bei den traditionellen Bauformen lässt sich dieser Bezug noch deutlich erkennen. Viele unterschiedliche Gebäude der Baugeschichte stehen für diesen regionalen Bezug. An einem einfachen und prominenten Beispiel aus der Baugeschichte lässt sich gut verdeutlichen, wie ausgeprägt das Wissen um die Effekte und Bedeutung passiver baulicher Maßnahmen zur Verbesserung der Aufenthaltsqualitäten war. Anhand der Alhambra in Granada lässt sich dies gut beschreiben. Aufgrund der geografischen Lage im Bereich der Sierra Nevada liegt Granada auf einer Höhe von ca. 600 m ü. NN. Die Stadt ist von heißen und trockenen Sommern und sehr kalten Wintern geprägt. Um in den Räumen des Palastes die extremen Temperaturen des Sommers Andalusiens auszuhalten, wurde die Palastanlage kleinteilig mit unterschiedlichen Innenhöfen und Gebäudeteilen angelegt. Pflanzen und Wasserbecken bestimmen das Erscheinungsbild dieser Innenhöfe. Das, was heute zuerst als repräsentatives Schmuckelement erscheint, ist jedoch auch eine Form von bauphysikalischem Wissen, um die Erwärmung von Bauteilen und die Kühlung der Innenhöfe aus Eigenverschattung und Begrünung mit integrierten



**Abb. 11:** Blick über den Patio de los Arrayanes in der Alhambra in Granada



**Abb. 12:** Arkaden in Bologna, die das Erdgeschoss vor der direkten Sonnenbestrahlung schützen

Wasserflächen zu erzielen. Alle diese Konstruktionsmaßnahmen hatten unmittelbaren Einfluss auf die klimatischen Bedingungen in diesen Wohnbereichen der Alhambra.

Das Bauen, gleich in welcher Region, war schon immer dem Zwang der Wirtschaftlichkeit und der Nachhaltigkeit unterworfen. Erst mit der beginnenden Industrialisierung und der Entwicklung neuer Baustoffe und Bauweisen lösten sich in der Architektur die regionalen Bezüge auf. Mit der Moderne kam es zu einer architektonischen Globalisierung, die aufgrund der technischen Möglichkeiten den Ortsbezug auflösten und das Wissen um regionale klimatische Besonderheiten vernachlässigten.

Keine 100 Jahre später stehen demgegenüber Anforderungen, die von Planern und Gebäuden Nachhaltigkeit, die Schonung von Ressourcen, Energieeffizienz und Lebenszyklusbetrachtungen erwarten.

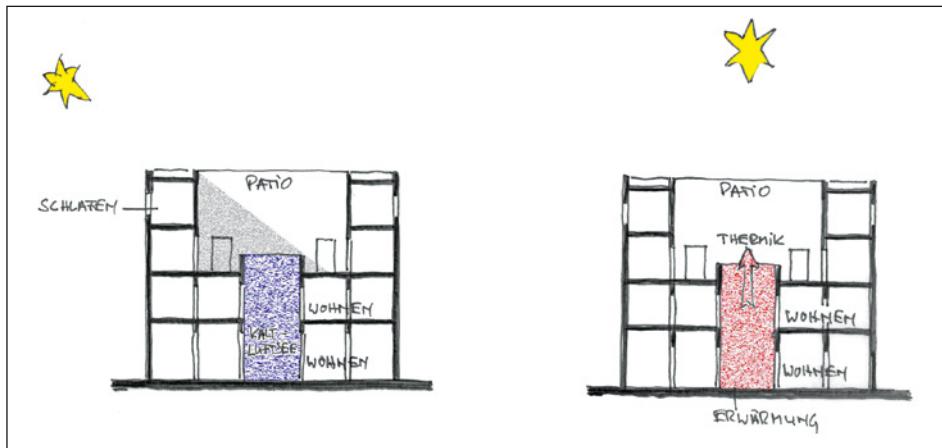
## 2.1 Bauen im regionalen Bezug

Aufgrund der extremen klimatischen Verhältnisse in einigen Teilen Afrikas, bildeten sich hier Konstruktionsweisen heraus, die eine Reaktion auf die großen Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht zeigten und eine traditionsreiche Auseinandersetzung mit den Bedingungen der Umgebung darstellen.

Mit einfachen Mitteln wurden zwischen dem 15 und 35 Grad nördlicher Breite Lehmhäuser errichtet, an denen ein hohes Maß an Auseinandersetzung mit den vorherrschenden klimatischen Bedingungen erkennbar ist.<sup>4</sup> Dadurch, dass unter normalen Bedingungen die Tage klar und unbewölkt sind, empfangen diese Gebäude am Tag eine starke Sonnenbestrahlung und Erwärmung, die in den Nachtstunden umkehrt und aufgrund des klaren Himmels zu einer starken Abkühlung führt. Um diesen Bedingungen gerecht zu werden, entwickelte sich hier ein Gebäudetyp, der durch die Nutzung von Innenhöfen zuerst einmal nach innen orientiert ist. Hieraus resultierte eine introvertierte Wohnform, die zugleich prägend für das Stadtbild wurde. Die Ausbildung der Innenhöfe folgte dem Prinzip der Eigenverschattung und somit der Reduzierung der Bauteilerwärmung durch direkte Sonnenbestrahlung. Die Flächen wurden so ausgerichtet, dass Dachflächen und West- und Ostwände möglichst klein gehalten wurden oder sich gegenseitig verschatteten. Zur Optimierung der Eigenverschattung wurden die Gebäude dicht zusammenge stellt, was ebenso auch in südeuropäischen Altstädten noch zu sehen ist. Ergänzt wurde die städtebauliche Komponente mit einer kompakten Bauweise, die ihre Räume in die Höhe stapelte anstatt sich in der Breite auszudehnen. Nach Lander und Niermann ist dabei zur Klimaregulierung das Seitenverhältnis des Innenhofes von Bedeutung. Entscheidend ist danach, dass die Höhe der raumumschließenden Wände größer ist als die Längen der Wände. Die Innenhöfe gleichen danach eher einem Schacht, bei dem die direkte Bestrahlung auf die Wandflächen reduziert ist.

Um die Extremen der klimatischen Situation auszugleichen, nutzte man Konstruktionen mit Materialien, die einen hohen Masseanteil, wie z. B. Lehm, besitzen. In den Nachtstunden kühlen diese Materialien langsam ab. Aufgrund der hohen Rohdichte und

4 vgl. [27], S.18



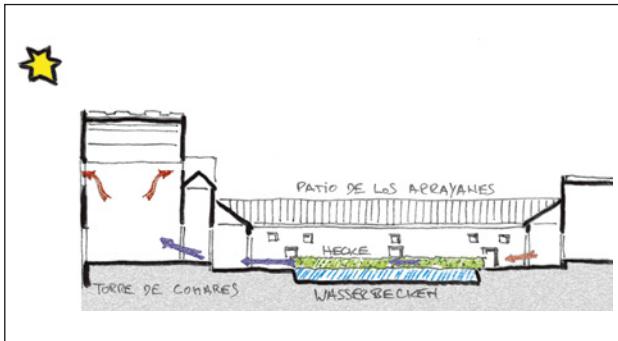
**Abb. 13:** Gegenüberstellung der Wirkungsweise eines Patios. Während der Nacht bildet sich im Innenraum ein Kaltluftsee. Durch die Modellierung der angrenzenden Bauwerksvolumen wird die Erwärmung des Kaltluftsees relativ lange verzögert. Erst mit der einsetzenden direkten Bestrahlung beginnt die Erwärmung der tangierenden Bauteilflächen und somit auch des angrenzenden Luftvolumens.

Materialstärke erfolgt aber auch ihre Erwärmung im Tagesgang nur langsam. Damit wirken diese Konstruktionen ausgleichend auf den Innenraum.

Die Kombination von Raumgeometrie und Materialien führte dazu, dass sich in den Innenhöfen über Nacht ein Kaltluftsee entwickelte. Die schwerere, weil dichtere kalte Luft, verblieb bis lange in den Tag im Innenhof und erwärmte sich nur langsam, wenn die mittägliche Sonne direkt in den Innenhof schien. Ein anderes Konstruktionsprinzip zeigt sich dagegen an den oberen Räumen, die dem Schlafen dienen. Die Dachdecken erfuhren die größte solare Bestrahlung und damit Erwärmung. Dadurch, dass diese Räume jedoch dem Schlafen dienen, war die Tagessituation nicht ausschlaggebend. Vielmehr wählte man die Konstruktion so, dass die Phasenverschiebung des Wärmedurchgangs von 8 bis 12 Stunden<sup>5</sup> dazu führte, dass der Wärmeeintritt in den Raum dann am günstigsten war, wenn es außerhalb bereits zur nächtlichen Kühlung kam. Im Innenraum kam es so zu einer Erwärmung, wenn sie nicht störend war.

Diese einfachen konzeptionellen und konstruktiven Maßnahmen wurden ergänzt durch Zu- und Abluftführungen, die diese Effekte in diesen Wohnhäusern unterstützen. Zugleich wurden, wie schon von Benevolo [3] beschrieben, die Aufenthaltsräume zu den Innenhöfen hin orientiert. Ergänzt wurden diese Strukturen häufig durch kleine Türme, die in die Hauptwindrichtung gestellt wurden und die Thermik in den Gebäuden begünstigte oder, wie am Beispiel der Alhambra in Granada gut ersichtlich, durch Innenhöfe mit Wasserbecken. Im Patio de los Arrayanes nutzte man eine Kombination unterschiedlicher baulicher Maßnahmen gegen die sommerliche Hitze. Im Zentrum des Patios befindet sich ein von Pflanzen umgebenes Wasserbecken. Da sich die Wasserflächen aufgrund ihrer Stoffeigenschaften und Wärmespeicherfähigkeit weniger stark erwärmen als die umgebenden massiven Bauteile, tragen die Becken zur Kühlung der Innenhöfe durch die

<sup>5</sup> vgl. [27], S. 20



**Abb. 14:** Schematischer Schnitt durch den Patio de los Arrayanes und den Torre de Comares in der Alhambra. Im Zentrum des Patios liegt ein heckengesäumtes Wasserbecken. Durch die Dichteunterschiede ergibt sich eine Thermik im Torre de Comares, was dazu führt, dass kühlere Luft aus dem Patio nachströmt.

Verdunstung des Wassers bei. Auf einer der Stirnseiten des Innenhofes liegt der Comares-Saal, dem eine Kolonade vorgelagert ist. Die Kolonaden schützen die Wand des Comares-Saals im unteren Bereich vor der direkten Bestrahlung durch die Sonne. Im Inneren des Saals unterstützen offene kleine Bodenkanäle, durch die Wasser fließt, die Kühlung der Luft. Dieses immer gleiche System findet man in allen Innenhöfen der Alhambra, einem Bau, der heute Weltkulturerbe ist und in der Zeit der nasridischen Herrscher bis ins 15. Jahrhundert errichtet wurde.

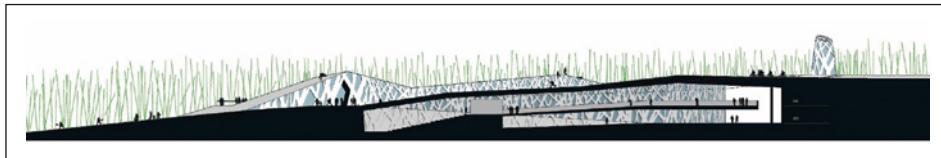
Auf eine ganz andere und wesentlich einfachere Weise reagierten in Granada die Bewohner des Sacromonte, einem der Alhambra gegenüberliegenden Berghang. In dem Lösboden der Hänge gruben die Bewohner Höhlen, die sich nur wenig zum Außenraum öffneten. Häufig besaßen die Wohnhöhlen nur einen kleinen Eingang mit einem Fenster. Die Innenräume bestanden aus aneinander gereihten und organisch geformten Räumen mit geringer Höhe. Die Architektur nutzte die Eigenschaften der vorhandenen Böden und der puffernden klimatischen Eigenschaft des Erdreiches. Aufgrund der geringen Anzahl von Öffnungen und der Überdeckung der Räume mit dem Berghang, entwickelte sich in diesen Räumen in den heißen Sommermonaten ein relativ ausgeglichenes Wohnklima.



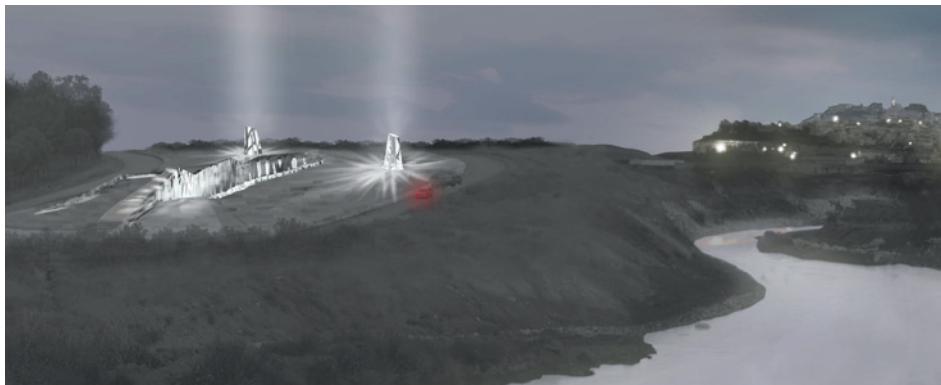
**Abb. 15:** Eingang zu einer ehemaligen Höhlenwohnung im Barrio Sacromonte in Granada, Museo del Sacromonte, Granada (Quelle Abb. 15 und 16: Museo del Sacromonte, Granada)



**Abb. 16:** Innenansicht des Wohnraums in einer Höhlenwohnung in Granada



**Abb. 17:** Schnitt durch das Auditorium der Stadt Puente Genil



**Abb. 18:** Wettbewerbsentwurf für das Auditorium der Stadt Puente Genil der Architekten Carlos Martín González & Fco. Javier Abarca Álvarez, 1. Preis Realisierungs-Wettbewerb »Salón de Exposiciones en Puente Genil Córdoba, España«

Diese traditionellen Ideen kann man auch in modernen Entwürfen für heiße Regionen wiederfinden. Der Wettbewerbsentwurf der Architekten Martin und Abarca aus Granada für ein Auditorium aus dem Jahr 2010 zeigt den gleichen klimatischen Ansatz, wie er bei den Wohnhöhlen umgesetzt wurde. Durch das Absenken des Auditoriums in den Boden werden die günstigen Effekte der Erdüberdeckung genutzt. Das Hauptvolumen des Gebäudes wird in die Landschaft eingebettet und entzieht sich somit der intensiven direkten Bestrahlung der Sonne. Über einen Patio im Zentrum des Gebäudes öffnet sich das Auditorium dem Besucher. Durch diese Maßnahmen werden die direkt auf das Gebäude einwirkenden Wärmelasten reduziert und zugleich der Energiebedarf zur Kühlung verringert. Zugleich nutzen die Architekten die Effekte eines zentralen Kamins, in dem sich die Luft erwärmt und mit dem entstehenden Dichteunterschied der Luft eine natürliche Thermik entsteht und damit die Strömung der Luft in den Räumen in Gang setzt.

Durch das Absenken des Gebäudes entsteht ein Temperaturvorteil, der vom Temperaturausgleich und der Pufferung des Wärmeverlaufs im Erdreich geprägt ist. Vereinfacht kann der Temperaturverlauf jahreszeitenabhängig und für Zentraleuropa angenommen werden. Dadurch ergibt sich bereits in 2,5 m Tiefe ein maximaler Temperaturunterschied von ungefähr 6,5 °C über das gesamte Jahr. Ab einer Tiefe von ungefähr 20 m unter der Geländeoberkante kann sogar von annähernd konstanten 10 °C ausgegangen werden. Heute bieten diese Bedingungen einen Vorteil, der auch für eine aktive Gebäudetemperierung herangezogen werden kann.



**Abb. 19:** Der Bādgir von Dowlatabad in Yazd (Quelle: 22 MSE-Ing. Architektin)

Ebenso findet man in der Baugeschichte Beispiele, die in heißen Regionen Windfänger nutzen, um die Lüftung in einem Gebäude auf eine einfache Weise zu verbessern. Dazu zählt der Bādgir, der ein altes persisches Architekturelement ist (siehe Abbildung 19). Seit mehreren Jahrhunderten wird diese Bauform genutzt, um die Belüftung und die Luftzirkulation in Gebäuden zu verbessern. Meist ist der Bādgir ein massiver gemauerter Turm, der von den untersten Räumen eines Gebäudes bis über das Dach hinausreicht. Das Turminnere ist häufig in vier getrennte Lüftungskanäle unterteilt, diese Einzelschächte können am Ende des Turms in alle Himmelsrichtungen separat geöffnet oder geschlossen werden.

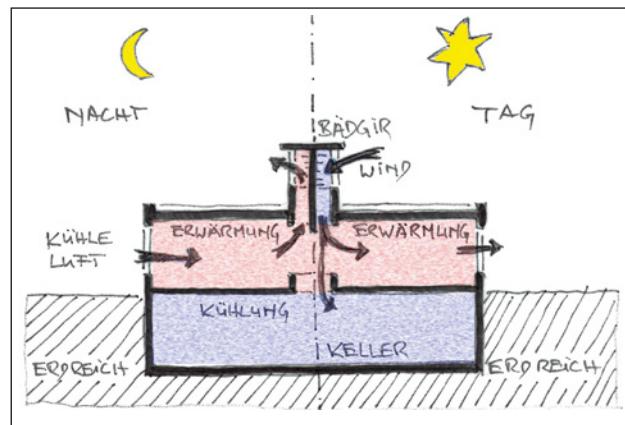
Die Höhe des Turms ermöglicht eine Wärmeströmung, die auch als Kamineffekt bezeichnet wird. Herrschen im Gebäude höhere Temperaturen als außerhalb und liegt im Außenbereich annähernde Windstille vor, wirkt der Kamineffekt. Das Prinzip beruht auf dem Auftrieb der warmen Luft, da diese eine geringere Dichte als kalte Luft besitzt. Die warme Luft strömt dann aufwärts. Auch kalte Nachtluft kann so durch das Gebäude strömen, da die warme Luft durch den Lüftungsturm abtransportiert wird und die kältere Außenluft durch Fensteröffnungen und Öffnungsschlüsse nachgezogen wird. Ein weiterer Vorteil liegt in der Bauweise. Da in den heißen persischen Regionen massiv gebaut wird, haben insbesondere die Wände aus Mauerwerk eine hohe Dichte und damit auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Die Materialeigenschaften bilden damit eine Grundlage, durch die noch während der ersten Tageshälfte nach Sonnenaufgang ein Nutzen der Nachtkühlung zu spüren ist. Die Wände kühlen in den Nachtstunden so stark aus, dass Sie zu Tagesbeginn die aufgewärmte Luft abkühlen und dadurch indirekt noch für eine Kühlung sorgen. Ist eine Windströmung in Richtung des Turmes vorhanden, dreht sich der Effekt um und die Luft strömt in den Turm abwärts. Die Bedingung dafür ist, dass der abwärts gerichtete Winddruck höher ist als der Auftrieb. Wenn dieser Fall vorliegt, entsteht ein Staudruck auf der angeströmten und windzugewandten Seite (Luv-Seite) und drückt die kalte Luft durch den Bādgir, der dabei gekühlt wird, was aber nicht zu einer deutlichen Erwärmung der Luft führt. Die warme Luft in den Räumen muss dann durch Fensteröffnungen nach draußen strömen.

Die Öffnungen am oberen Ende des Turms dienen der Regulierung der einströmenden Luft. Besonders wichtig ist dieser Regelungseffekt für den Fall der Kältespeicherung. Wenn der Bādgir in der Nacht durch eine abwärts gerichtete Luftströmung ausgekühlt

**Abb. 20:** Blick über die im Wüstengebiet gelegene Stadt Yazd im Iran (Quelle: Roya Faghaninia MSE-Ing. Architektin)



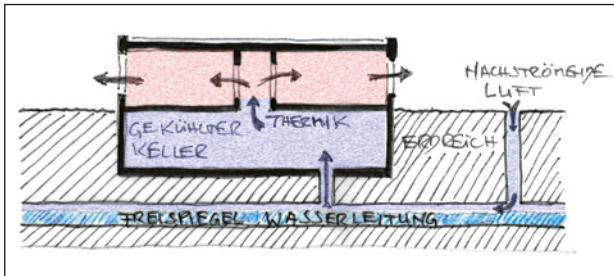
**Abb. 21:** Schematische Funktionsweise eines Bādgir bei Nacht und Tag. In der Nacht kühlt die einströmende Außenluft die Masse der Konstruktion.



wurde, kann die niedrigere Temperatur des Turmmauerwerks aufrechterhalten werden, indem alle Öffnungen über Tag geschlossen werden und so keine warme Luft einströmen kann. Auf diese Weise kühlt die Luft ab und fällt in die angrenzenden Räume. Zusätzlich kann aber auch frische Außenluft durch kleine Öffnungen in das Gebäude gelangen, die dann an den Wänden abgekühlt. Durch den Speichereffekt der Masse der Wände kann auch tagsüber kurzzeitige kühle Luft erzeugt werden.

Ebenfalls aus dem arabischen Raum stammen die Quantate, die in erster Linie der Frischwasserversorgung in Wüstengebieten dienen. Sie sind als Brunnen an horizontale Freispiegelleitungen angeschlossen, die deutlich unterhalb der Geländeoberkante verlaufen. Dadurch wird eine Erwärmung des fließenden Wassers verhindert. Um diese Anlagen zur Kühlung von Gebäuden heranzuziehen wird eine Zuluft-Öffnung außerhalb des Gebäudes gesetzt, durch die heiße Außenluft einströmen kann und in der Freispiegelleitung abgekühlt wird. Eine zweite Öffnung im Bereich des Gebäudeuntergeschosses ermöglicht dann einen Kaltluftteintrag in das Gebäude. Im Gebäude setzt sich die Strömung der Luft durch die natürliche Thermik fort.

Unter heißen klimatischen Bedingungen stellt die Anordnung von Räumen und deren Nutzung eine der einfachsten und immer anwendbaren Strategien dar, um die Aufenthaltsqualität in den Räumen zu verbessern. Die Anordnung erfolgt in der Regel sehr



**Abb. 22:** Funktionsweise der Kühlung über Quantate über eine horizontale Freispiegelbrunnenleitungen. Über vertikale Schächte strömt Außenluft nach und kühlt im Erdreich und über dem Wasserspiegel ab.

pragmatisch und orientiert sich ausschließlich an den »Wärmeeinstrahlbedingungen«. Dabei werden Räume und deren Nutzung zur Tageszeit passend angeordnet. Häufig werden Häuser mit einem Innenhof gebaut und die einzelnen Räume des Hauses so gruppiert, dass sie nach Tages- und Jahreszeit genutzt werden können.

Dabei wird dieses Nutzerverhalten von der Bauweise mit Innenhöfen unterstützt, wie auch in der Alhambra, die mit extensiver Bepflanzung ausgestattet ist. Der Innenhof selbst ist keine direkte Möglichkeit der Kühlung, aber er bietet durch die Bepflanzung einen beschatteten Rückzugsort sowie mehr Fläche zur Querlüftung. Die dichte und hohe Bepflanzung dient dann als Schattenspender, indem sie einen Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung bietet. Zusätzlich entsteht im Innenhof so eine Temperatur, die unter der regulären Außentemperatur liegt. Durch diese Abschottung bleibt die kalte Luft zwischen der umliegenden Bebauung und unterhalb der Bäume. Der Innenhof wird so zu einem Kaltluftsee. Auch die Temperatur in den Räumen zur Straßenseite hin ist damit im Regelfall höher als die Lufttemperatur im Innenhof. So kann bei einer Querlüftung über die Räume der thermische Effekt ebenfalls ausgenutzt werden, und es entsteht eine Luftströmung von der Außenluft zum Innenhof.

In Regionen, die nicht über das gesamte Jahr als heiß eingestuft werden, ist bei der Wahl der Bepflanzung jedoch darauf zu achten, dass Pflanzen und Bäume vorhanden sind, die im Winter ihre Blätter verlieren. Dann erreichen auch die Sonnenstrahlen der tiefstehenden Wintersonne die Umfassungswände, was zur hofseitigen Erwärmung des Gebäudes durch die Strahlungseinträge beitragen kann.

Auf eine andere Weise können Bepflanzungen auch in kalten Regionen genutzt werden, um den Heizbedarf in einem Gebäude zu reduzieren. Als eine Reaktion auf eine starke Belastung aus Wind und Schlagregen, findet man heute noch u. a. in den Ortschaften um Monschau in der Eifel Buchenhecken. Ausgerichtet zur Hauptwetterseite stellen die Buchenhecken, mit einer Höhe bis zu 5 Metern, eine einfache Maßnahme dar, um Wind und Starkregen abzuhalten.

Als Dacheindeckung findet man nicht nur in der Eifelregion das Reetdach. Das Schilfrohr Reet, welches häufig an Ufer und in schlammigen Geländen anzutreffen ist, wurde bereits ca. 4000 v. Chr. für die Pfahlbauten am Bodensee als Eindeckung von Gebäuden genutzt.

Reetdächer können als Kaltdach mit Hinterlüftung oder als Warmdach ausgeführt werden. Bei dem Bau eines Warmdachs mit Reet kommen dann seine guten wärmedämmenden Eigenschaften zum Tragen. Die niedrige Rohdichte des Reets selbst, der hohe

**Abb. 23:** Denkmalgeschütztes Bauernhaus in Höfen/Eifel mit Schutzhecken auf der windzugewandten Wetterseite des Gebäudes.



Anteil eingeschlossener Luft und die geringe Dichte der Gesamtpackung über die Höhe besitzen einen relativ geringen Wert der Wärmeleitfähigkeit.

Ebenso bildete die Nutzung lokaler Energiequellen eine Grundlage für das Bauen auch in Europa. So war ein Großteil der frühindustriellen Gebiete geprägt von regionalen Energien, die heute zu den erneuerbaren Energien zählen. Im regenreichen Gebiet des Bergischen Landes entwickelte sich noch vor der Industrialisierung des Ruhrgebietes eine Fertigungskultur, die in der Nähe der Wohnhäuser, die Ressource Wasserkraft an Bächen und Flussläufen nutzte.

Eine wesentliche Eigenschaft historischer Wohnformen der kalten Regionen war, wie auch in den heißen Regionen, die Zonierung der Wohnfläche. Nicht alle Räume wurden einheitlich beheizt. Dagegen nutzte man jahreszeitlich bezogen unterschiedliche Räume, die Einheiten um die wenigen Wärmequellen in den Häusern bildeten. Erst die veränderten Bauformen und Konstruktionen, sowie technische Weiterentwicklungen, wie die Zentralheizungen veränderten das Nutzerverhalten und den Komfortanspruch.

Nicht nur in heißen Regionen wurden in der Bautradition Maßnahmen für die nutzungsoptimierte Bauwerksplanung umgesetzt, sondern überall dort, wo Energie eingespart werden muss oder die notwendige Energie nicht bereitgestellt werden kann, weil technische Maßnahmen dafür noch nicht erfunden waren. Dies betrifft neben dem Schutz vor übermäßiger Hitze auch die extreme Kühlung. Zu diesem Zweck wurden in Deutschland im 19. Jahrhundert in vielen Städten Eiskeller errichtet, um Eis über einen längeren Zeitraum lagern zu können und das Schmelzen ohne zusätzlichen Energieaufwand verhindert wurde.

Die städtischen Eiskeller wurden als unterirdische Bauwerke errichtet und meist mit einem zweischaligen Mauerwerk ausgeführt. Man machte sich also die konstante und niedrige Temperatur im Erdinneren zu nutzen und schützte nach dem Prinzip der Thermoskanne das Eis vor dem Erwärmen. Auf diese Weise konnte zwar ein Schmelzen nicht vollständig verhindert werden, aber durchaus sehr lange hinausgezögert werden. Damit blieben die Esvorräte lange erhalten. Um eine konstante Füllung des Eiskellers zu haben, reichte das im Winter anfallende Eis der Stadt nicht aus, sondern musste über mehrere Quellen über das Jahr auch käuflich erworben werden. Einen Auszug, wie Eis beschafft wurde, ist in Abbildung 24 aufgelistet. Die dort zu sehende Auflistung ist das für die Stadt Barmen, heute ein Stadtteil von Wuppertal, benötigte Eis.

<u>Art I</u> : aus dem Vieheller kiesigen Eisw. und Londoner Baustoffe, bei einem Mindest. Quantum von 100 Pfund: a. zur sofortigen Auslieferung, ab Jahr vorwegz. je Cto: 1 q. 20 Pf. b. Lieferung bis 1. August ab: 2. - c. 1. November ab: 2. 15. - d. Einzelstücke in Landstr. 100, 2. 100 Pf. Einkleidung: Säcke oder Lattenfrane finger eingefüllt und verarbeitet zum Transport. Heute vergraut.
<u>Art II a.</u> inländisches Eis maggomeise Lieferungen ab 1. August 1868 ab a. zu 100 Cto: 1 q. 15 Pf. b. ausländisches Eis in Blöcken bei einzelnen Baggern je Cto: 1. 22. 6. c. Getrocknet Eis, bei Abnahme veranlaßtes 10 Pfund ab Basal angefüllter Baggerrad je Cto: 18. 6. - d. Nörtingisches Eis in Blöcken bei Sackhun August Lieferungen ab Nörtingen je Cto: 15. - der von Böhmen auch billiger ab Bremen nach Hamburg o.

**Abb. 24:** Auszug aus der Beschaffungsliste für das Eis des städtischen Eiskellers der Stadt Barmen (heute: Wuppertal) (Quelle: Stadtarchiv Wuppertal)

Das besondere an den errichteten Eiskellern war nicht nur die Nutzung der niedrigen Erdtemperatur, sondern vor allem die Anwendung und Kenntnis über Baustoffe mit geringer Wärmeleitfähigkeit.

Durch die Aufzeichnungen im Stadtarchiv Wuppertal ist besonders gut die Konstruktionsbauart und Vorgehensweise bei der Anlage eines Eiskellers nachzuvollziehen. In den Unterlagen ist eine detaillierte Beschreibung eines Eiskellerbaus unter dem städtischen Krankenhaus in Wuppertal-Barmen aus dem Jahr 1867 vorhanden. Der Eiskeller wurde als Gebäude mit einem quadratischen Grundriss und einer Seitenlänge 17'4" (5,28 m) unterirdisch errichtet.<sup>6</sup> Das Treppenhaus bzw. der Eingangsbereich ist als Anbau von außen vorgesehen worden. Um eine solide Konstruktion zu errichten wurden die Außenwände aus massivem Ziegelstein errichtet, welche von außen ausgefugt und von innen zur Dichtigkeit mit Asphalt verputzt wurden. Weiterhin ist wörtlich aus dem Erläuterungsbericht der Sonderakte aus dem Jahr 1867 zu entnehmen:

*Im inneren Raum wird ein Rumpf von Holz eingesetzt, der erstens einen luftleeren Raum zwischen Mauer und Holzwand abschließt. Und zweitens eine Holzwand (Doppelwand) bildet, deren Zwischenraum von 12" Dicke mit einem schlechten Wärmeleiter ausgefüllt sein. Die Decke wird von unten verschalt, von oben gediebt und die Zwischenräume wie oben ausgefüllt. Auf die Decke kann zur größeren Isolierung noch schlechter Wärmeleitungsstoff gelagert werden. Im Grunde des Eisbehälters ist ein Balkenrost angebracht, welcher alle Feuchtigkeit des etwa schmelzenden Eises durchlässt und über ein Pflaster in eine Versenkgrube in Kiesboden abgeleitet wird.*

An dieser Ausführung wird sowohl das sehr hohe konstruktive als auch werkstofftechnische Wissen vor fast 150 Jahren deutlich. Diese Bauart entspricht einem heutigen zweischaligen und gedämmten Wandaufbau. Das Einbringen und Herausholen des Eises in den Keller war durch eine Eingangsschleuse mit zweiflügeligen Türen möglich. Diese

<sup>6</sup> Einheit Fuß: 1 ft. = 1' = 12" (Zoll entspricht englischsprachig inch) = 0,3048 m

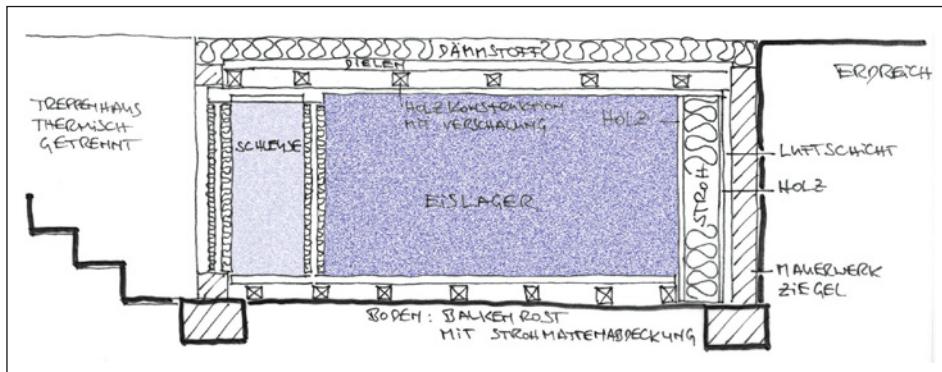


Abb. 25: Schematischer Aufbau eines Eiskellers mit der Gebäudeaußenhülle und Eingangsschleuse

Türen wurden zur Steigerung des Wärmeschutzes mit Strohmatten abgedeckt. Außerdem ist durch die Schleuse eine weitere Pufferzone eingerichtet worden, die eine Trennung von kalter Innenluft und warmer Außenluft ermöglichte. Für den dichten Abschluss erhielten die Türen, zusätzlich zu der äußeren Strohmattenabdeckung, von innen eine Auffütterung mit weichen Stoffen.

Interessant ist hierbei der gebaute Wandaufbau. Bei den erläuterten Schichten, die in Tabelle 1 mit der jeweiligen Dicke und den bauphysikalischen Kennwerten zusammengefasst sind, ergibt sich ein U-Wert von etwa  $0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Dieser U-Wert unterschreitet die Anforderungen an unsere aktuell gültige Energieeinsparverordnung (EnEV 2014) um 40 %. Für die Dämmebene wurde Stroh mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,065 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  angenommen, welche sich aus dem Mittelwert der Wärmeleitfähigkeiten in Halmrichtung (Breitenrichtung) und quer zur Halmrichtung (Dickenrichtung) ergibt.

Nach Angaben der damaligen Planer können bei der Einlagerung in dem Eiskeller bis zu einem Drittel des Eises unter Berücksichtigung des Verbrauchs durch den Sommer gebracht werden.

Nach der Größe ist der vollständige Abfluss des Wassers von sehr wesentlichem Einfluss. Falls kein Kanal beim Bau eines Eiskellers in der Nähe war, musste dafür gesorgt

Schichtbezeichnung	Dicke [cm]	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]	Stoffdichte $\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
Konstruktionsholz	2,4	0,130	500
Strohfüllung	30,5	0,065	410
Konstruktionsholz	2,4	0,130	500
ruhende Luftsicht	5,0	0,278	1
Asphaltputz	1,0	0,700	2 100
Vollziegel	24,0	1,200	2 200

Tab. 1: Zusammenstellung der Schichten der Eiskeller-Außenwand aus dem Jahr 1867

werden, dass das schmelzende Wasser auf natürlichem Wege abfließen und auch versickern konnte. Hierfür musste ein tief ausgenommener Trichter im Boden errichtet werden, in dessen Öffnung grobes Material, wie zum Beispiel Kies oder grobe Asche, gefüllt wurde, damit das Wasser möglichst rasch nach unten abfloss.

In der Konstruktionsbeschreibung eines Eiskellers zu Köln, der als Erfahrungswert für den Eiskeller in Barmen dient, sind ebenfalls sehr detaillierte bauphysikalische Kenntnisse eingeflossen. So heißt es in einem Brief an Planer:

*Vor dem Eisfahren muss der Keller einige Tage offen sein, damit er durch und durch kalt wird. Die Wände würde ich etwas anders empfehlen, die Luftsicht in der Wand kann viel schwächer sein, dagegen müssten die ausgefüllten Schichten dicker sein. Wir haben folgende Maße. Ein Strohdach ist allerdings viel besser als alles andere, wir haben hier auch erst eine 6"-dicke (15,2 cm) Schicht, die mit Häcksel gefüllt ist, dann einen Zwischenraum von wenigen Zollen und darauf ein 9"-dickes (22,9 cm) Strohdach. Das würde dort nicht angehen und würde ich deshalb jedenfalls eine 2te dicke Schicht mit Häcksel anbringen. Die Türen müssten dick mit Stroh oder Häcksel aufgepolstert und so eingerichtet werden, dass die äußere geschlossen ist, wenn man die innere öffnet. [...] Hauptbedingung bleibt immer eine ausreichende Masse Eis und beim Verbrauch guter Eisschränke damit das gefrorene Eis möglichst erhalten bleibt. Mit jedem Öffnen des Kellers geht Eis verloren, weil Wärme eindringt. Der Eingang zum Keller muss möglichst nach Norden liegen.*

Auch bei dieser Planungsempfehlung erkennt man, dass die Dämmeschichtdicken so groß wie möglich angesetzt wurden. Denn anders als mit sehr guter Dämmung konnte auch zum damaligen Zeitpunkt das Eis nicht vor dem Tauen geschützt werden. Der schwächste Punkt der Konstruktion war der Eingangsbereich, obwohl er mit einer thermischen Schleuse konstruiert wurde. Die Ausrichtung des Eingangs nach Norden zeigt bereits planerisches Verständnis für eine energieoptimierte Planung.

### 3 Umweltwärme – Umweltkälte

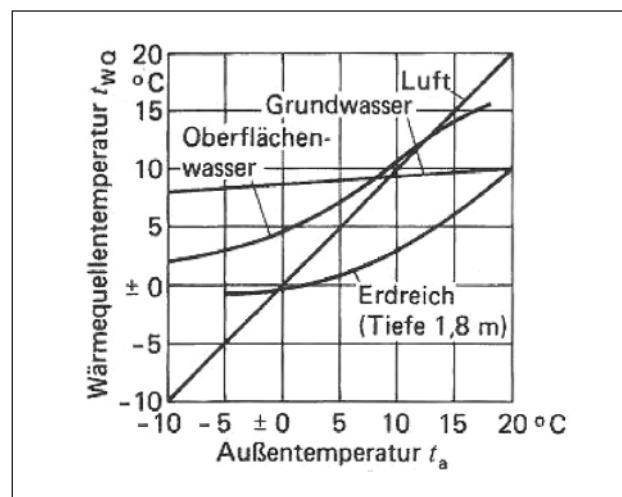
Umweltwärme und Umweltkälte stehen als potentielle Energieform nicht gleichermaßen überall zur Verfügung. Die Nutzung ist immer stark an die Rahmenbedingungen des Ortes gebunden, die u. a. geprägt sind vom Klima und von jahreszeitlichen Schwankungen. Für die Nutzung in Gebäuden stehen unterschiedliche Systeme zur Verfügung, die in die Haustechnik eingebunden werden können:

Energiequelle	Energie – Technische Anlage
Solare Globalstrahlung	Strom – Photovoltaik
	Wärme – Solarthermie
Erdwärme oberflächennah	Wärme – Wärmepumpe
Erdwärme oberflächenfern	Strom – geothermische Kraftwerke
Außenluft	Wärme – Wärmepumpe
Wind	Strom – Windenergiemodul

**Tab. 2:** Verknüpfung von Energiequellen und möglichen technischen Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien

Geringfügig anders verhält es sich bei der Geothermie, die nur oberflächennah klimatischen Einflüssen unterliegt, dafür aber umso mehr den geologischen Besonderheiten unterworfen ist. Eine grobe Übersicht zeigt das Diagramm zu den Wärmequellentemperaturen aus der VDI 2067-6 von 1989. Hier wird offensichtlich, dass Luft als wärmetragendes Medium die größten Schwankungen im Jahresgang hat, während Grundwasser und Erdreich relativ konstante Temperaturen im Jahresverlauf haben.

**Abb. 26:** Anhaltswerte der Umweltwärmequellen Luft, Grundwasser, Oberflächenwasser und Erdreich im Jahresgang nach VDI 2067-6:1989-09 (Quelle: [33], S. 494)



## 3.1 Klima und regionale Besonderheiten

### 3.1.1 Normative klimatische Bedingungen Deutschlands

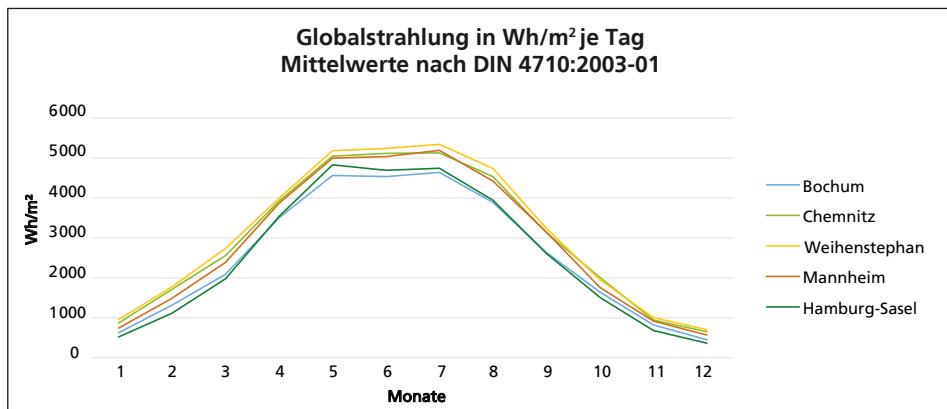
Deutschland ist geprägt von einem Übergangsklima. Während der westliche und nördliche Bereich deutlich maritime Einflüsse besitzt, hat der östliche und südliche Teil dagegen eher ein Klima mit kontinentalem Charakter, das geprägt ist von trockenen Sommern und schneereichen Wintern, insgesamt befindet sich Deutschland in einem Übergangsbereich.

Für den maritim geprägten Teil resultiert hieraus eine höhere Feuchtelast der Luftmasse. Die Folge ist eine stärkere Trübung bzw. Bewölkung der Atmosphäre, was wiederum die solaren Gewinne beeinflusst, da sich hierdurch der Anteil der direkten Strahlung aus der Globalstrahlung verändert.

Eine erste Abschätzung der möglichen vorhandenen Ausbeute aus Strahlung kann auf der Grundlage der tabellierten durchschnittlichen Werte des TRY (Test Reference Year) zur Strahlungsintensität nach DIN V 4108-6:2003-06 erfolgen. Zur Bewertung möglicher energetischer Gewinne können auf der Grundlage der DIN V 4108-6 die Mittelwerte der Strahlungsintensität und der Außenlufttemperaturen für einzelne Monate und das Jahr herangezogen werden. Deutschland wird danach in 15 Regionen eingeteilt:

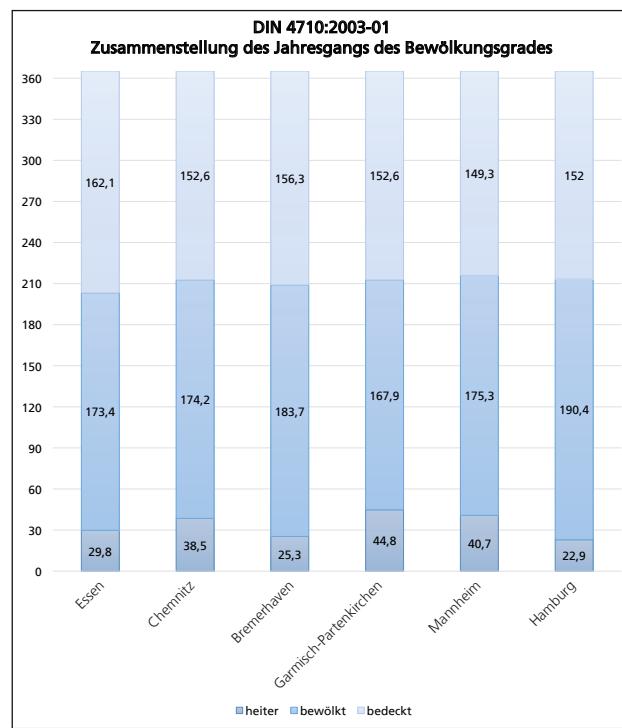
Region	Ort	Region	Ort	Region	Ort
1	Norderney	6	Harzgerode	11	Würzburg
2	Hamburg	7	Essen	12	Mannheim
3	Arkona	8	Geisenheim	13	Freiburg
4	Potsdam	9	Chemnitz	14	Weihenstephan
5	Braunschweig	10	Hof	15	Garmisch-Partenkirchen

**Tab. 3:** Die 15 Referenzregionen in Deutschland der mittleren Strahlungsintensität nach DIN V 4108-6.



**Abb. 27:** Jahresgang der mittleren Globalstrahlung unterschiedlicher Orte (Quelle: DIN 4710:2003-01)

**Abb. 28:** Beispielhafte Gegenüberstellung einiger deutscher Städte bzw. meteorologischer Stationen. Übersicht der tabellierten Häufigkeit von heiteren, bewölkten und bedeckten Tagen als Mittelwerte der Jahre von 1961 bis 1990 (Quelle: DIN 4701:2003-01).



Für diese Regionen werden klimatische Randbedingungen beschrieben, die auf den gemittelten Werten des TRY beruhen. Diese gemittelten Werte basieren auf Langzeitauswertungen von über 30 Jahren und enthalten u. a. folgende Werte:

- Durchschnittliche monatliche Strahlungsintensität  $\text{W/m}^2$  und Temperatur
- jährliche Strahlungsangebot  $\text{kWh/m}^2$  und Temperatur

Die Werte werden für Monate und Jahre für horizontale Flächen und für unterschiedlich geneigte Dachflächen mit  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $90^\circ$  angegeben. Diese Werte stehen in Bezug zur Orientierung von Flächen und damit auch für ein Gebäude. Die Bestrahlungsstärken werden bei dem Test Reference Year in direkte und diffuse Einstrahlung getrennt und als mittlere Stundenwerte angegeben. Die Tabellen lassen eine schnelle und grobe Bewertung zu. Wird eine genauere Kalkulation zur Effizienz notwendig, müssen Berechnungen durchgeführt werden, die den tatsächlichen Bezug der zu untersuchenden Flächen eines Gebäudes zur Orientierung und zum Azimut herstellen.

Neben der Einteilung nach DIN V 4108-6 gibt es eine weitere Unterteilung Deutschlands nach VDI 2078. Die VDI 2078 unterteilt Deutschland in Kühllastzonen und geht von vier grundlegenden Zonen aus. Dazu kommt noch eine Höhenlagenzone, die eine Ableitung der Kühllastzone 1 ist. Die Richtlinie gibt je Zone den Tagesmittelwert der Temperatur und eine maximale Auslegungstemperatur an.

## 3.2 Umweltmeteorologie

Die Bestimmung der Wechselwirkungen zwischen Oberflächen und der Atmosphäre kann auf der Grundlage der VDI-Richtlinie 3789 erfolgen.<sup>7</sup>

Blatt 2 beschreibt die Prozesse aus Erwärmung und Abkühlung von natürlichen und künstlichen Körpern, die sich zwischen den Körperoberflächen und der umgebenden Luft einstellen. Dabei stehen die optimale Nutzung alternativer Energiequellen und die Belastungen, welche auf Konstruktionen aufgrund von Temperaturveränderungen wirken, im Fokus der Betrachtung.

Die in Blatt 2 dargestellten Berechnungen beruhen auf Untersuchungen, die auf Stundenmittelwerte beruhen. Daher wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass mit dieser Richtlinie auch nur Stundenmittelwerte berechnet werden können. Die Richtlinie lässt sich verwenden für:

- Extremwerte des Tagesganges der Strahlungsbilanz von beliebig orientierten Flächen
- Häufigkeitsverteilungen der Strahlungsbilanz von beliebig orientierten Flächen in Abhängigkeit von Tages- und Nachtzeit
- Strahlungsbelastung von beliebig orientierten Flächen in Abhängigkeit von der Tages- und Jahreszeit
- Einfluss der Oberflächeneigenschaften (kurzwelliger Albedo also Rückstrahlvermögen, effektiver langwelliger Emissionsgrad, Transmissionsgrad)
- Einfluss der Horizontaleinschränkung und -erweiterung.

Die Strahlungsbilanz  $Q$  für eine horizontale Fläche wird gebildet aus:

$$Q = (G - R) + (A - E)$$

Dabei ist:

- |   |   |
|---|---|
| G | Globalstrahlung in $\text{W/m}^2$ , Summe von direkter und diffuser Sonnenstrahlung   |
| R | reflektierte Globalstrahlung / von dem Körper reflektierter Anteil von G  |
| A | abwärts gerichtete Wärmestrahlung der Atmosphäre, auch kurz Gegenstrahlung genannt; Temperaturstrahlung der atmosphärischen Gase (hauptsächlich Wasserdampf) und der Wolken |
| E | Wärmestrahlung des Körpers  |

Bezüglich der Wärmestrahlung einer Körperoberfläche erläutert die Richtlinie, dass man die Werte entweder aus Messungen oder aus Bestimmungen aus der Energiebilanz der Oberfläche nach Gleichung:

$$Q + K + H + V + P = 0$$

erhält.

<sup>7</sup> vgl. VDI 3789, Blatt 2

Dabei ist:

- Q Gesamtstrahlungsbilanz: Summe aller positiven und negativen Strahlungsflussdichten zur Oberfläche
- K Wärmeflussdichte aus dem Inneren des Körpers zur Oberfläche
- H Flussdichte der fühlbaren Wärme von der Atmosphäre zur Oberfläche infolge molekularer und konvektiver Wärmeleitung
- V Flussdichte latenter Wärme infolge Kondensation und Verdampfung
- P Flussdichte der durch Niederschlag zur Oberfläche transportierten Wärme

Jedes Glied dieser Bilanzierung bedeutet Energieflussdichte oder Leistungsdichte in der Einheit  $\text{W/m}^2$ .

Tatsächlich wird hier deutlich, dass die Verwendung normierter oder tabellierter Lufttemperaturwerte, die aus Quellen des Deutschen Wetterdienstes stammen, anstelle von Oberflächentemperaturwerten zu großen Fehlern führt. Verwendet man die tabellierten Lufttemperaturwerte, wird die Wärmestrahlung um bis zu 100 % unterschätzt, da bei intensiver Sonnenstrahlung die Oberflächentemperatur bis zu 50 K und mehr über der Lufttemperatur liegen kann.

### 3.3 Globalstrahlung und Strahlungsangebot

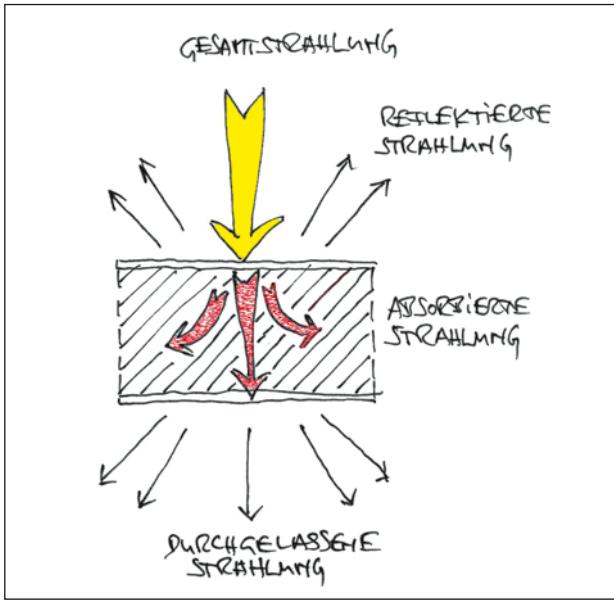
Eine der Grundlagen zur Bewertung der Effizienz von solarthermischen Anlagen bilden die Werte der Globalstrahlung mit der Einheit  $\text{kWh/m}^2$ . Diese Werte werden vom Deutschen Wetterdienst in tabellarischer Form oder als Globalstrahlungskarte ausgewertet. Diese Unterlagen geben Aufschluss über den zu erwartenden solaren Energieertrag bzw. mit welchen Einstrahlungsverhältnissen zu rechnen ist.

Da nicht sämtliche extraterrestrische Strahlung bis zur Erdoberfläche gelangt, handelt es sich bei der Globalstrahlung bereits um bereinigte Werte, welche von unterschiedlichen Faktoren bestimmt werden. Je nach geographischer Lage gehen zwischen 30 und 70 % bereits in der Atmosphäre verloren, ein weiterer Teil der Strahlung wird gestreut und liegt dadurch nur als diffuse Strahlung vor. Zusätzlich verändern sich die Trübungsfaktoren jahreszeitlich und in Abhängigkeit vom Standort und der Tageszeit. Für die reine ungetrübte Atmosphäre aus Idealgasen beträgt der Trübungsfaktor 1. Dieser wird erhöht durch das grundsätzliche Vorhandensein von Staub und Wasserdampf. Dabei ist der Trübungsfaktor variabel sowie orts- und jahreszeitabhängig. Stadtlagen haben aufgrund ihrer Immissionen einen höheren Trübungsfaktor zur Folge.

Wenn die direkte Strahlung aus der Trübungsfaktorenberechnung bekannt ist, lässt sich die Strahlung auf beliebig geneigte Flächen unter Zuhilfenahme von Korrelations- und Diffusstrahlungsmodellen errechnen.

Die solarthermische Nutzung basiert auf der fotothermischen Umwandlung von kurzwelliger Solarstrahlung in Wärme.

Durch das Auftreffen der Strahlung auf Materie wird ein Teil der Energie absorbiert. Diese Fähigkeit wird als Absorptionsvermögen  $\alpha$  bezeichnet. Der Wert  $\alpha$  gibt Aufschluss über die Fähigkeit eines Materials den Anteil der auftreffenden solaren Energie aufzunehmen.



**Abb. 29:** Schematische Darstellung der auf ein Bauteil auftreffenden Gesamtstrahlung und den daraus resultierenden Wärmestromen aus der Strahlungsaufteilung

Zur Bewertung und Auslegung von solarthermischen Anlagen muss in der Vorplanung eine Überprüfung der möglichen energetischen Gewinne unter Berücksichtigung der vorherrschenden Globalstrahlung des Einsatzortes gemacht werden. In Deutschland kann man anhand der Globalstrahlungskarten des Deutschen Wetterdienstes, in Folge DWD genannt, feststellen, dass die jährliche horizontale Globalstrahlung von ca. 980 kWh/m<sup>2</sup> in der Region Hamburg bis über 1 170 kWh/m<sup>2</sup> im Großraum München geht.

Dies bedeutet, dass in den für Deutschland ertragreichsten Regionen die Jahreswerte der Globalstrahlung nur um 20 % höher liegen, als in den schwächsten Regionen. Für die Nutzung von Sonnenenergie sind diese Werte im Vergleich zu den südlichen europäischen Ländern eher ungünstig. Zudem besitzen die westlichen Gebiete Deutschlands durch die Nähe zur Nordsee ein maritim geprägtes Klima und damit mehr bewölkte oder trübe Tage, was die Wirtschaftlichkeit von Solaranlagen beeinflusst.

Zusätzlich muss man beachten, dass wir im Grunde in Nordeuropa eine zyklische Abweichung von Strahlungsangebot und Heizwärmennachfrage besitzen, da das Strahlungsangebot dann am größten ist, wenn die Nachfrage am geringsten ist. Der Vergleich zu anderen europäischen Regionen zeigt, dass das Strahlungsangebot besonders in den Mittelmeerregionen deutlich höher ist:

- Griechenland bis 1 700 kWh/m<sup>2</sup>
- Frankreich bis 1 400 kWh/m<sup>2</sup>
- Italien bis 1 700 kWh/m<sup>2</sup>
- Spanien bis 1 700 kWh/m<sup>2</sup>

Zur Bewertung der möglichen solaren Ausbeute muss zusätzlich betrachtet werden, dass in den südlichen Regionen um das Mittelmeer der direkte Anteil der Strahlung wesentlich

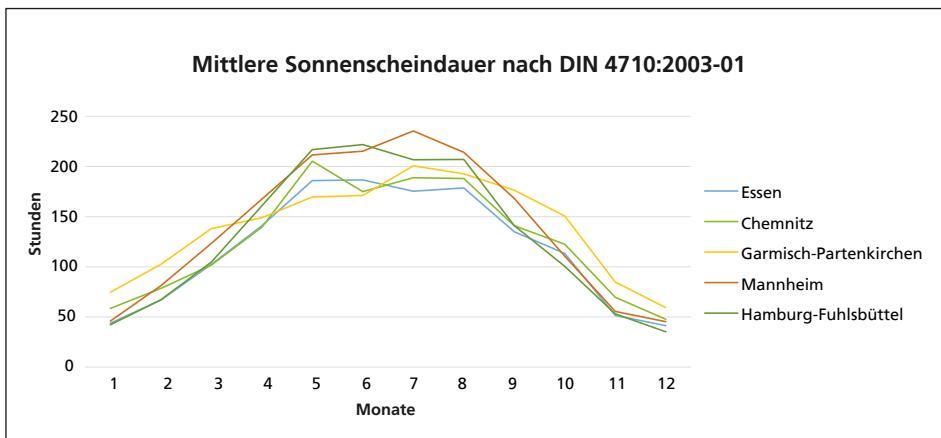


Abb. 30: Mittlere Sonnenscheindauer an unterschiedlichen Standorten (Quelle: DIN 4710:2003-01)

höher ist. Demzufolge müssen die in Nordeuropa zum Einsatz kommenden Systeme auch den diffusen Anteil aus der Globalstrahlung nutzen können. Im Jahresmittel liegt die diffuse Strahlung nach Aussage des Öko-Institut e. V. aus Freiburg bei etwa 40 % in Deutschland.

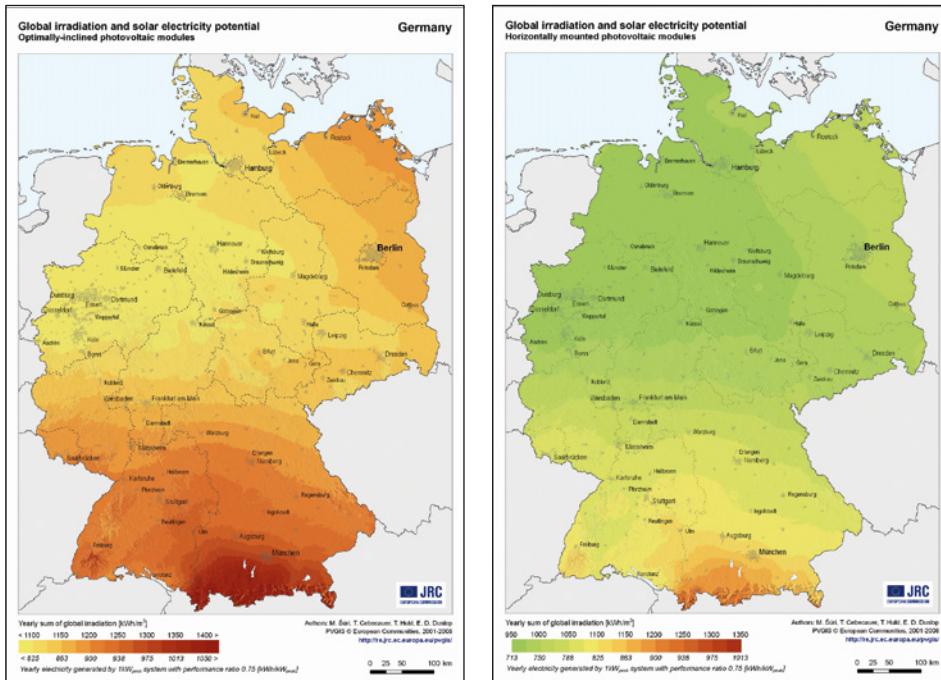


Abb. 31: Globalstrahlungskarte für Deutschland nach PVGIS mit dem jährlichen Strahlungsangebot bei optimal ausgerichteten Photovoltaikmodulen (Quelle: European Communities, 2001–2008, Šuri T., Huld T., Dunlop E. D., Ossenbrink H. A.)

Für die Auslegung einer solarthermischen Anlage, gleich ob Luft- oder Wasserkollektoren, sind neben den Anteilen von direkter und diffuser Strahlung der Standort, die Orientierung, der Bezug zum Azimut, und die Neigung der Dach- bzw. Absorberflächen von Bedeutung.

### 3.3.1 Der Einfluss des Windes

Wind beeinflusst unmittelbar den thermischen Zustand von Bauteiloberflächen. Hohe Windgeschwindigkeiten führen zu einer stärkeren Kühlung von Oberflächen. Damit reduziert Wind die zu erzielenden energetischen Gewinne von nicht abgedeckten Solarabsorbern. An Außenbauteilen führt starker Wind zu erhöhten Wärmeströmen von innen nach außen, woraus ein größerer Heizwärmebedarf resultiert. Neben dem auf die Oberflächen direkt einwirkenden Winddruck, führt der Windsog auf der windabgewandten Seite ebenfalls zu erhöhten Wärmeverlusten. Um den negativen Einfluss des Windes hinsichtlich der Wärmeverluste zu verringern, hat sich mit der energiesparenden Bauweise auch die höhere Anforderung an die Winddichtigkeit bei Außenbauteilen durchgesetzt.

Bereits mit dem Gebäudeentwurf und der Ausrichtung des Baukörpers kann auf die Wärmeverluste aus der Windexposition Einfluss genommen werden. Das im Kapitel 1 gezeigte Beispiel des Wohnhauses von Frank Lloyd Wright in Middleton/Wisconsin zeigt genau die Potenziale, die durch die Ausrichtung und Einpassung im Gelände möglich sind. Mit der Absenkung des Gebäudes in das Gelände zur Hauptwindrichtung können die energetischen Verluste, die aus dem Wind resultieren, auf eine einfache Weise verringert werden.

Ein Beispiel traditioneller Siedlungsformen aus der Eifel zeigt, dass auch mit der bewussten Anordnung von Hecken zu den Hauptwindrichtungen Gebäude vor starkem Wind geschützt wurden.

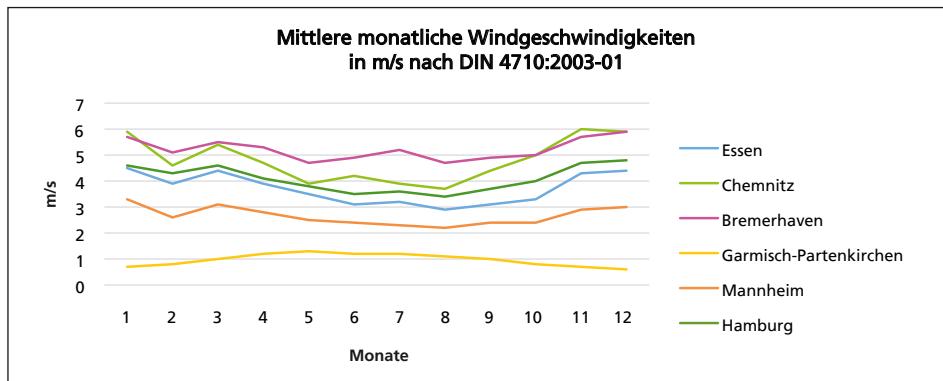
In den einfachen bauphysikalischen Berechnungen zum Wärmeschutz nach DIN 6946 wird der Einfluss aus der Konvektion in der Grenzschicht der Luft auf ein Bauteil in Form des äußeren Wärmeübergangswiderstandes  $R_{se}$ <sup>8</sup> berücksichtigt. Für alle außenliegenden Oberflächen wird dabei pauschal ein  $R_{se}$ -Wert von  $0,04\text{ (m}^2\cdot\text{K)}/\text{W}$  berücksichtigt, egal welche Orientierung die Fläche besitzt oder ob es eine Dach- oder Wandfläche ist. Der pauschalierte Wert aus der Norm entspricht einer Windgeschwindigkeit von 4 bis 5 m/s, was einer schwachen bis mäßigen Brise gleich kommt. Damit bildet die Norm nicht einen erhöhten Wärmeverlust durch Wind ab. Vielmehr führt die normative Berechnung zur Ermittlung des U-Werts dazu, dass die geringe Luftströmung vor dem Bauteil, wie eine Verbesserung im U-Wert dargestellt wird.

Tatsächlich sind die regionalen Windgeschwindigkeiten, wie es Kaltschmitt et al. [22] beschreiben, sehr unterschiedlich und in Abhängigkeit von dem umgebenden Gelände zu betrachten. Auf der Grundlage von Messungen des Deutschen Wetterdienstes können unterschiedliche Windgeschwindigkeiten den folgenden deutschen Regionen zugeteilt werden:

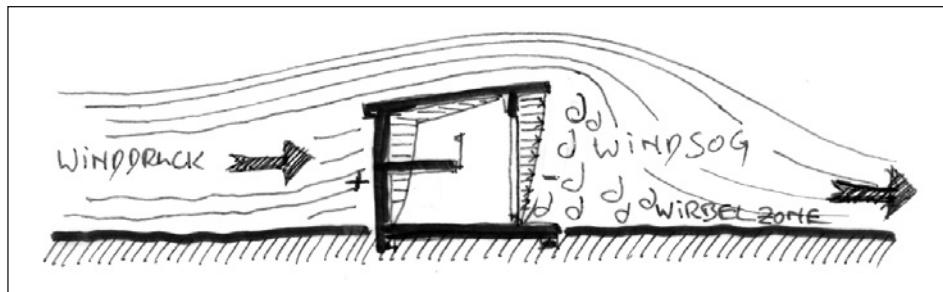
<sup>8</sup>  $R_{se}$  = Widerstand auf der äußeren Oberfläche (surface exterior)

- Nordsee, weit vor der Küstenlinie bis 8 m/s
- Ost- und westfriesische Inseln, Wattenmeer und Ostsee zwischen 7 und 8 m/s
- Nordseeküste im Mittel zwischen 6 und 7 m/s
- Anschließendes Binnenland und Ostseeküste zwischen 5 und 6 m/s
- Im inneren Binnenland Deutschlands kommen Windgeschwindigkeiten von 5 bis 6 m/s nur in Höhenlagen der Mittelgebirge vor
- Im restlichen nördlichen Teil Deutschlands herrschen Windgeschwindigkeiten zwischen 4 und 5 m/s
- Im südlichen Teil Deutschlands liegen die Windgeschwindigkeiten um 3 m/s
- In geschützten Flusstäler in Süddeutschland kann die Windgeschwindigkeit unter 2 m/s fallen.

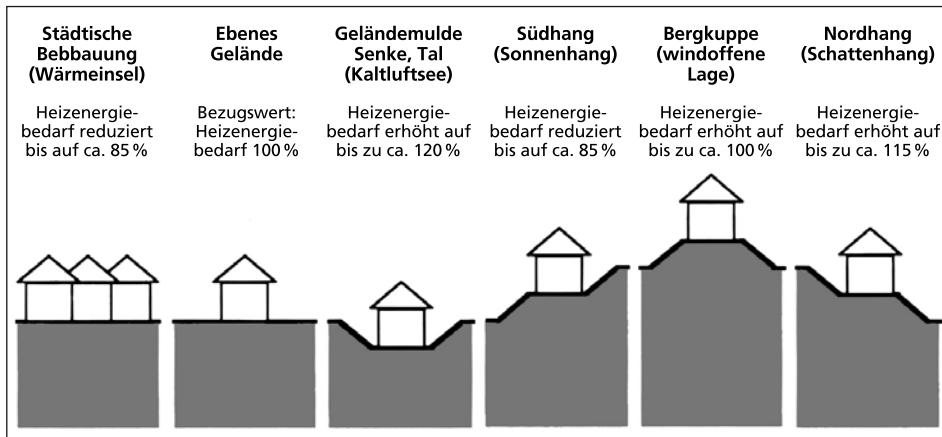
Eine Bewertung der regionalen Windverhältnisse kann auf der Grundlage der DIN 4710 erfolgen. Diese Norm enthält unter anderem die mittleren Windgeschwindigkeiten unterschiedlicher Referenzorte. Das folgende Diagramm zeigt den Jahresgang ausgewählter Orte nach DIN 4710 in Deutschland und deren monatliche Veränderungen der Windgeschwindigkeiten in m/s. Bis auf Garmisch-Partenkirchen wird offensichtlich, dass sich die Windgeschwindigkeiten an allen Orten während der Wintermonate erhöhen. Zusätzlich zeigt das Diagramm, dass mit zunehmender Entfernung zum Meer die oberflächennahe



**Abb. 32:** Mittlere Windgeschwindigkeiten ohne Windstille (Kälmen) in ausgewählten Orten (Quelle: DIN 4710:2003-01)



**Abb. 33:** Windanfall und Verwirbelungen an einem Gebäude



**Abb. 34:** Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von den lokalklimatischen Verhältnissen (Quelle: Grauthoff, M.; Mook, V.)

Windgeschwindigkeit aufgrund der Rauigkeit des Geländes abnimmt. Ausgenommen von dieser vereinfachten und verallgemeinerten Aussage sind Höhenlagen und Senken im Gelände. Werden Gebäude in diesen besonderen Lagen errichtet, können höhere oder geringere Windgeschwindigkeiten lokal auftreten.

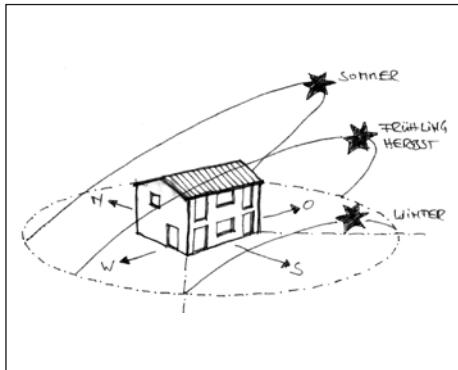
Für die Anforderungen an eine nachhaltige Gebäudeplanung ist es auch erforderlich, die lokalen klimatischen Verhältnisse zu berücksichtigen. Hierbei sind die Windverhältnisse besonders im Altbau für die Bewertung der energetischen Qualität zu berücksichtigen. Eine quantitative Aussage über den Heizenergiebedarf in Abhängigkeit der Gebäudelage liefert Abbildung 34. Zwischen der städtischen dichten Bebauung, welche eine Wärmeinsel erzeugt, und einer solitären Bebauung in einer Geländemulde liegt eine Spannweite des Heizenergiebedarfs von zirka 35 %. Anzumerken ist, dass bei luftdichteren Neubauten die Differenzen aufgrund der Geländelage des Gebäudes geringer sind.

### 3.3.2 Sonnenstände und Raumausrichtung

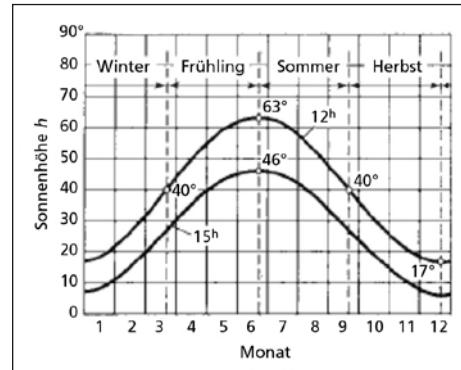
Wie bereits im ersten Kapitel am Beispiel des Hemicycle House von Frank Lloyd Wright gezeigt wurde, kann durch die Ausrichtung eines Gebäudes erheblicher Einfluss auf die energetische Qualität und das Raumklima genommen werden. Deutlich wird dieser Einfluss bei der Betrachtung des Tagbogens des Sonnenlaufes (siehe Abbildung 35).

Die bestmögliche Berücksichtigung der Wirkung des Sonnenlaufes kann bei der Planung von Gebäuden bereits in einer frühen Planungsphase eine bedeutende Rolle spielen. Und zwar dann, wenn ein grobes Nutzungs- und Raumkonzept aufgestellt wird, um festzulegen, wie die einzelnen Gebäudeteile idealerweise genutzt werden können.

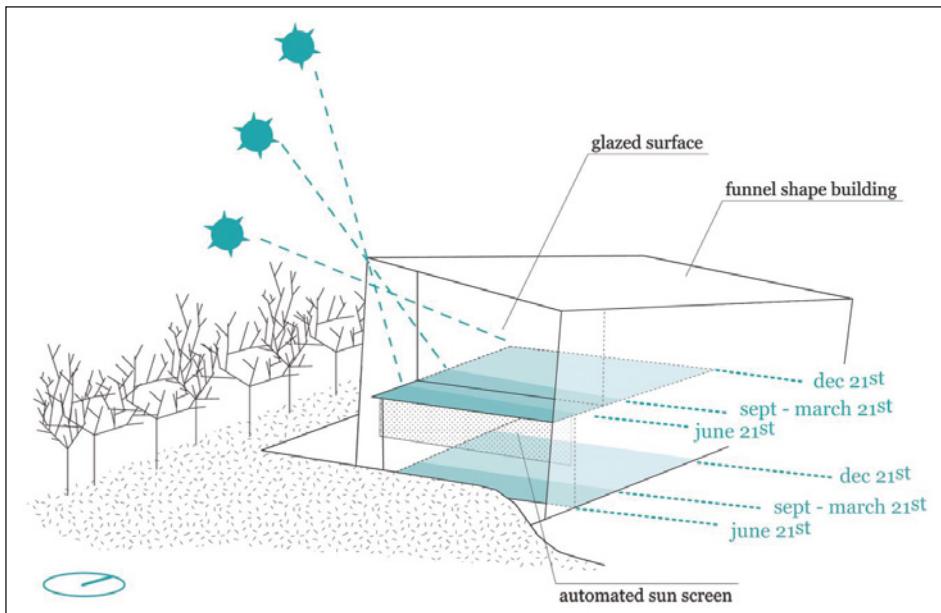
Dabei kann bei jeder Planung ein Sonnenstandsdiagramm erstellt werden, um jahres- und tageszeitenabhängig darzustellen, an welchem Punkt und in welchem Winkel die Sonnenstrahlen auf und in ein Gebäude treffen. Auf der Grundlage von Erfahrungswerten können die aufgeführten Folgen für einzelne Fassadenflächen auch ohne Simulationen angenommen werden.



**Abb. 35:** Sonnengang im Jahresgang mit dem Höchststand im Sommer und dem Tiefststand im Winter

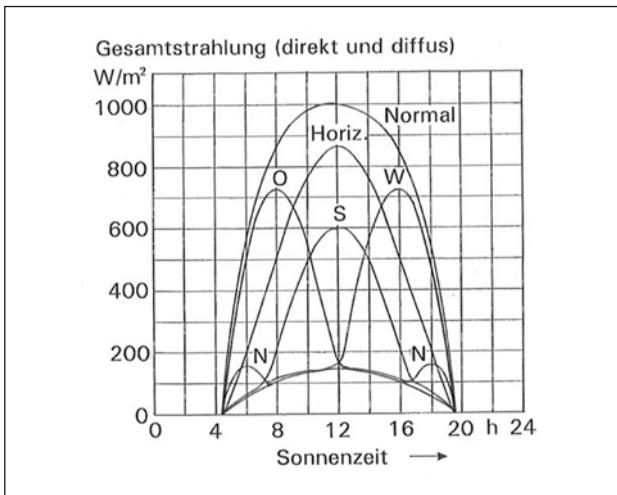


**Abb. 36:** Sonnenhöhe  $h$  im Jahresgang um 12h und 15h für 50° nördlicher Breite (Quelle: [33], CD 14; Bild 1.1.4-4)



**Abb. 37:** zeichnerische Überprüfung der direkten Sonneneinstrahlung am Mittag bei unterschiedlichen Sonnenständen im Jahresverlauf (Quelle: Architekten Traverso-Vighy mit Universität Padua, vgl. Kapitel 6.1)

- Zum Osten ausgerichtete Fassaden liegen in der Morgensonne und sind daher geschützt vor der Mittagssonne. Die Fassaden erwärmen sich langsam, da die Bauteilkühlung der Nacht (Wärmesenke) noch wirkt.
- Fassaden in Süd-Lagen haben die längste Sonneneinstrahlzeit. Hier sind Beschattung und Belüftung unbedingt erforderlich.



**Abb. 38:** Gesamtstrahlungsleistung je  $m^2$  Fläche im Tagesgang auf Wänden verschiedener Ausrichtungen im Juli für  $50^\circ$  nördlicher Breite. Gesamtstrahlung bei einem Trübungsfaktor nach Linke von  $TL = 4,3$  (geringe Trübung) (Quelle: [33], CD 14, Bild 1.1.4-7)

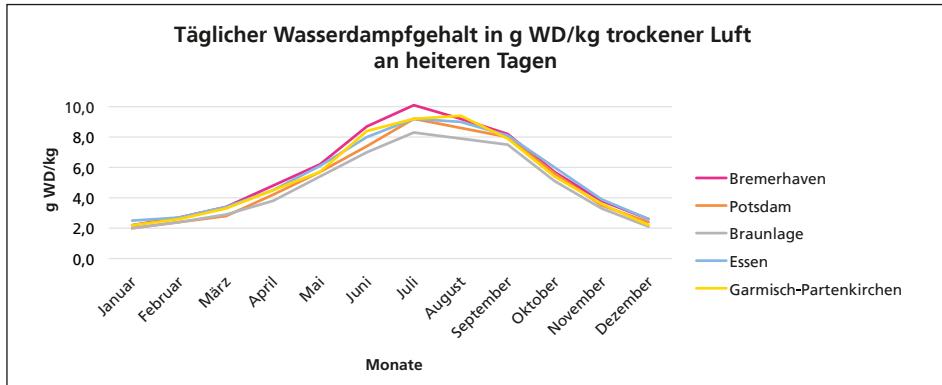
- Die West-Lage ist die heißeste Lage im Sommer, weil die Außenluft im Tagesgang bis spät abends aufgeheizt wird und erst spät die Strahlen der tiefstehenden Sonne die Fassadenfläche verlassen.
- Die Nord-Lage ist abgewandt von der Sonne und hat keine direkte Sonneneinstrahlung.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass über Berechnung der Sonnenstände nur theoretische Werte ermittelt werden können. Da die Berechnung nur den Idealfall der Sonnenstände auf der Grundlage der geografischen Breite berücksichtigt, bleibt die von dem Grad der Bewölkung beeinflusste tatsächliche Sonnenscheindauer, die Höhe des betrachteten Gebiets und die Umgebungsbedingungen der umliegenden Landschaften ohne Belang.

### 3.3.3 Trübungsfaktoren und solare Gewinne

Nur 50 % der solaren Globalstrahlung erreichen die Erdoberfläche. Diese 50 % teilen sich in direkt einfallende Strahlung und diffuse Strahlung auf. Nach Abzug aller zusätzlichen mindernden Faktoren beträgt der Anteil der direkt einfallenden Sonnenstrahlung ca. 25 %. Der diffuse Anteil der Strahlung besteht aus von Dunst und Wolken gestreuter Strahlung. Diese Streuung ist relativ gleichmäßig. Um Sonnenenergie optimal nutzen zu können, ist jedoch ein hoher Grad an direkter Bestrahlung notwendig. Sämtliche Trübungen der Atmosphäre reduzieren den direkten Anteil der Sonneneinstrahlung und haben damit unmittelbaren Einfluss auf die solaren Erträge.

Diese atmosphärischen Trübungen können mit dem Trübungsfaktor  $T_L$  nach Linke berücksichtigt werden. Der Trübungsfaktor  $T_L$  resultiert aus der optischen Dicke einer getrübten und feuchten Atmosphäre. Die VDI 3789 benennt folgende Trübungsfaktoren:



**Abb. 39:** Mittelwerte des Wasserdampfgehalts in g/kg trockener Luft an heiteren Tagen im Jahresgang  
(Quelle: DIN 4710)

- sehr saubere Kaltluft  $T_L = 2$
- saubere Warmluft  $T_L = 3$
- feuchtwarme oder stagnierende Luft  $T_L = 4$  bis  $6$
- verunreinigte Luft  $T_L > 6$

Nach Linke liegen die Trübungsfaktoren zwischen 3,6 im Dezember und 6,4 im Juni. Mit der Erwärmung der Atmosphäre erhöht sich zugleich die Trübung der Atmosphäre als Dunst durch die steigende Wasseraufnahme der wärmeren Luft. Für die Nutzung von Solarkollektoren oder Absorbern resultieren hieraus ungünstigere Bedingungen, weil diese Techniken einen hohen Anteil direkter Strahlung benötigen.

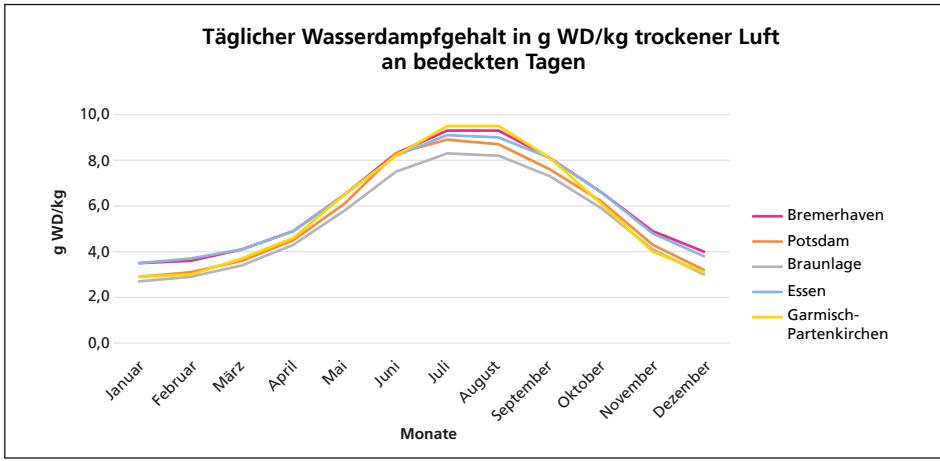
Neben den jahreszeitlichen Veränderungen hat der Tagesverlauf der Sonne Einfluss auf den Trübungsfaktor und die solare Ausbeute. Im Monat Juli steigt der Trübungsfaktor von 3,7 morgens um 7.00 Uhr bis zum Höchststand um 12.00 Uhr auf 5,1. Dagegen kehrt sich der Trübungsfaktor im Tagesverlauf im Januar um. Ausgehend von 4,8 um 9.30 Uhr sinkt der Wert bis 12.00 Uhr auf 4,1.

Im Jahresgang ist auffallend, dass der Trübungsfaktor  $T_L$  in den Mittelwerten in den kalten Wintermonaten am geringsten ist, weil dann die kalte Luftmasse die geringste absolute Luftfeuchtigkeit besitzt. Mit dem Anstieg der Außenlufttemperaturen zum Sommer steigt auch der Trübungsfaktor  $T_L$  auf Werte die zwischen 5,5 bis 7,5 liegen.

Die Trübungsfaktoren der Luft nach VDI 3789 können – so Gassel (1997) – auch nach geografischen oder und zivilisatorischen Bedingungen geordnet werden:

- Industriegebiet
- Großstadt
- ländliches Gebiet
- Hochgebirge.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> vgl. [13], S. 18



**Abb. 40:** Mittelwerte des Wasserdampfgehalts in g/kg trockener Luft an bedeckten Tagen im Jahresgang (Quelle: DIN 4710:2003-01)

So erreicht der Trübungsfaktor in den Monaten Juni und Juli danach einen Höchstwert von ca. 5,9 in Industriegebieten, ca. 4,4 in Großstadtlagen, ca. 3,5 in ländlichen Gebieten und ca. 2,3 im Hochgebirge. Nach Blatt 2, Anhang A, der VDI 3789 von Oktober 1984 sind die Unterschiede in Deutschland so gering, dass grundsätzlich mit den monatlichen Mittelwerten gerechnet werden kann.

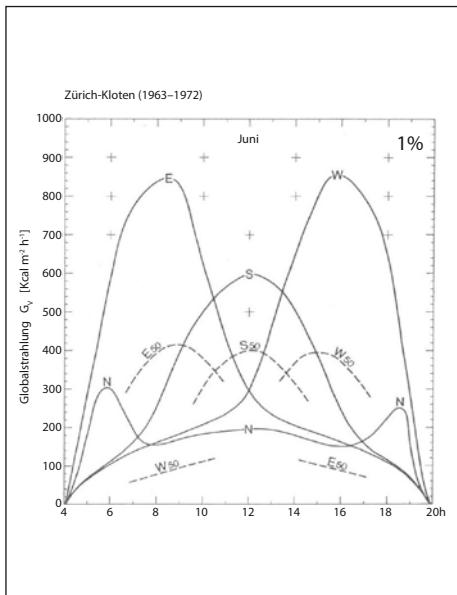
### 3.3.4 Azimut $\beta$ und die Ausrichtung des Bauwerks

Die Ausrichtung eines Gebäudes zur Sonne ist einer der wesentlichen Faktoren um solare Erträge zu nutzen oder ebenso energetische Verluste zu reduzieren. Natürlich ist dies insbesondere im innerstädtischen Kontext nicht immer umsetzbar, da Bebauungslinien oder Verschattungen aus angrenzenden Bebauungen oder Bäumen die solaren Gewinne beeinflussen. Der Umstand des unterschiedlich großen Energieeintrags in ein Gebäude findet in den normativen Berechnungsgrundlagen nach DIN V 4108-6 Berücksichtigung, die für ein vereinfachtes Berechnungsverfahren herangezogen werden können:

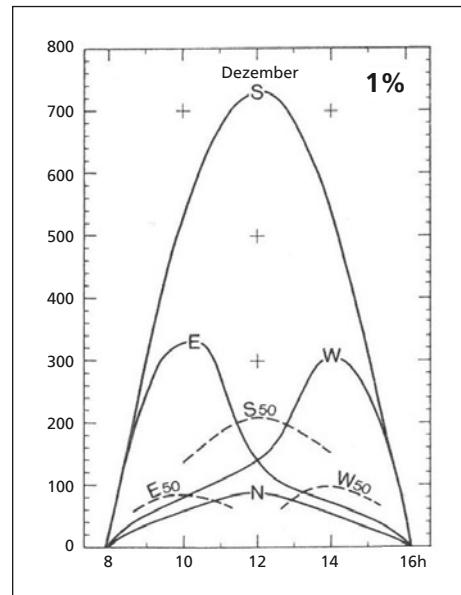
Orientierung	Südost bis Südwest	Nordwest bis Nordost	übrige Richtungen	Dachflächenfenster Neigung < 30°
$I_{s,HP}$	275 kWh/(m <sup>2</sup> a)	100 kWh/(m <sup>2</sup> a)	155 kWh/(m <sup>2</sup> a)	225 kWh/(m <sup>2</sup> a)

**Tab. 4:** Vorgaben der DIN V 4108-6 zur solaren Einstrahlung unterschiedlich orientierter Bauteilflächen während der Heizperiode.

Dieser vereinfachte Ansatz mit Mittelwerten zur Bilanzierung von Wärmegegewinnen ist nur für den Heizfall anwendbar. Ein Bezug zum sommerlichen Strahlungsangebot und dessen Besonderheiten wird hier nicht hergestellt. Unter sommerlichen Bedingungen verändern sich durch die Sonnenstände die Randbedingungen. In diesen Monaten erhal-



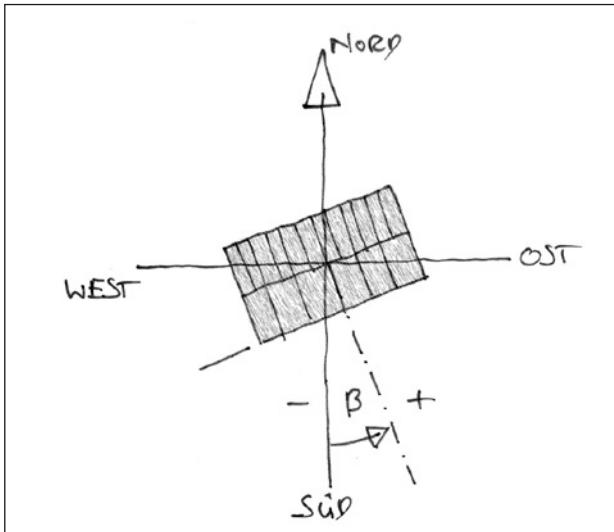
**Abb. 41:** Einwirkung der Globalstrahlung auf vertikal ausgerichtete Ost-, Süd-, West- und Nordflächen als Tagesverlauf im Juni als Mittelwerte aus den Jahren 1963–1972 für Zürich-Kloten. Kurvenzüge für 1 % aller ermittelten Strahlungszustände unter optimalen Bedingungen. Gestrichelt sind die Werte der Globalstrahlung unter 50 % der Summenhäufigkeit für die einzelnen Teilflächen dargestellt (Quelle: [35], S. 95).



**Abb. 42:** Einwirkung der Globalstrahlung auf vertikal ausgerichtete Ost-, Süd-, West- und Nordflächen als Tagesverlauf im Dezember als Mittelwerte aus den Jahren 1963–1972 für Zürich-Kloten. Kurvenzüge für 1 % aller ermittelten Strahlungszustände unter optimalen Bedingungen. Gestrichelt sind die Werte der Globalstrahlung unter 50 % der Summenhäufigkeit für die einzelnen Teilflächen dargestellt (Quelle: [35], S. 95).

ten die ostorientierten Flächen und ganz besonders die westorientierten Flächen hohe Wärmegewinne. Hier wird der Einfluss der morgendlichen bzw. abendlichen tiefstehenden Sonne deutlich. Bei den Westfassaden kommt zudem noch der Einfluss der verzögerten Erwärmung der Außenluft hinzu, was die Wärmegewinne zusätzlich beeinflusst. Die von Sabady veröffentlichten Auswertungen für ein Objekt in Zürich zeigen den Einfluss der Ausrichtung von Wandflächen deutlich. Die beiden Diagramme (Abbildung 41 und Abbildung 42) dokumentieren die saisonalen Spitzenwerte für 1 % der Bestrahlungszustände im Juni und Dezember. Unter optimalen sommerlichen Bedingungen wird offensichtlich, dass die Ost- und Westfassaden aufgrund der noch relativ tiefstehenden Sonne die höchste Energiemenge empfangen. Dagegen bleibt das Ergebnis der Südflasade zurück, da hier der Einfluss des großen Einfallwinkels der hochstehenden Sonne spürbar wird.

Im Vergleich dazu stellen sich die energetischen Gewinne für minder optimale Bestrahlungszustände ausgeglichener dar. Die eingestrichelten Kurvenzüge zeigen 50 % aller Bestrahlungszustände. Unter sommerlichen Zuständen ist danach kein wesentlicher Unterschied innerhalb der Ausrichtungen ersichtlich.



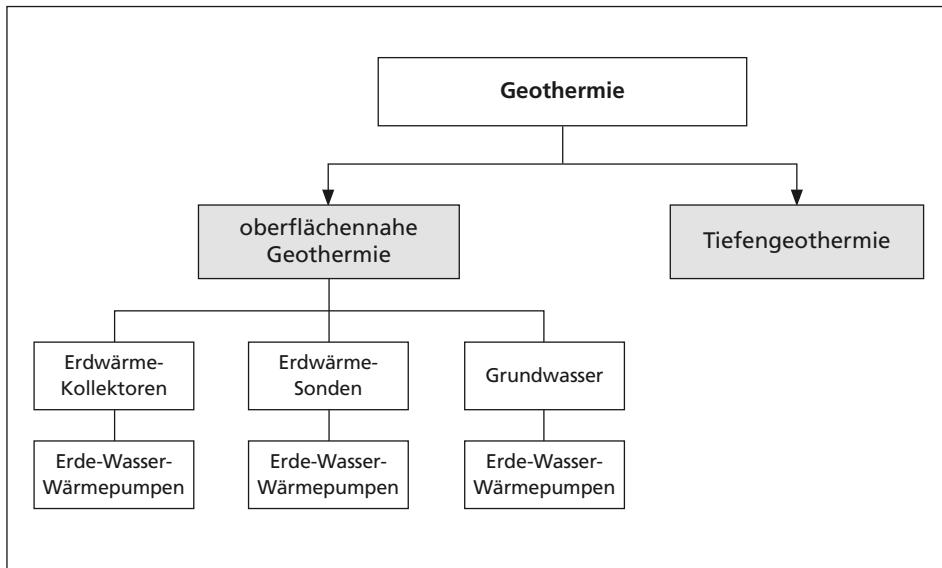
**Abb. 43:** Der Azimutwinkel  $\beta$  beschreibt die Abweichung der strahlungsempfängenden Fläche zur Ausrichtung nach Süden. Die Abweichung geht von  $+45^\circ$  bis  $-45^\circ$ .

Ganz anders zeigt sich dagegen die Auswertung der winterlichen Sommerstände auf die energetischen Gewinne von vertikalen Fassaden. Unter optimalen Bedingungen und bei 1 % aller Fälle empfängt die Südseite die höchste solare Bestrahlung. Dagegen bleiben sowohl Ost- wie auch Westseite deutlich zurück und im Unterschied zu den sommerlichen Gewinnen zeigt sich, dass bei 50 % der Häufigkeit unter winterlichen Bedingungen die Südseite deutlich höhere solare Erträge empfängt. Was unter sommerlichen Bedingungen noch sehr ausgeglichen erscheint und die Ausrichtung von Kollektoren kaum beeinflussen sollte, stellt sich unter den winterlichen Bedingungen schon wesentlich deutlicher dar.

### 3.4 Geothermie – Erdwärme und Grundwasser

In Abhängigkeit von den regionalen Bodenverhältnissen kann die Nutzung von Wärme aus dem Boden oder von Grundwasser in ein energetisches Konzept eingebunden werden. Unterschieden wird dabei die oberflächennahe Geothermie von der Tiefengeothermie.

Die Wärmegewinne können in Abhängigkeit von gewählten Verlegearten der Sonden oder Kollektoren stark abweichen. Bis in einen Bereich von ca. 15 m Tiefe unterliegt das Erdreich saisonalen Schwankungen. Diese können aus der solaren Bestrahlung, Niederschlägen und der Lufttemperatur resultieren. Erst ab 15 m Tiefe ab Geländeoberkante beginnt die neutrale Zone im Erdreich, bei der nahezu konstant immer  $10^\circ\text{C}$  vorhanden sind. Diese neutrale Zone geht bis ca. 30 m. Ab 30 m Tiefe verändert sich die wärmetechnische Eigenschaft des Erdreiches. Mit jeden weiteren 100 m Tiefe steigt die Temperatur im Boden um 3 K. Wird mittels Tiefengeothermie warmes Wasser gefördert, kann das Thermalwasser so warm sein, dass es direkt für Heizzwecke genutzt werden kann. Bei der Tiefengeothermie wird unterschieden zwischen dem hydrothermalen und petothermalen System. Das hydrothermale System nutzt heiße Quellen in großer Tiefe bis 5000 m.



**Abb. 44:** Arten der Geothermie

Hier sind Heißwassertemperaturen zwischen 130 °C und 160 °C möglich. Bei der petrothermalen Geothermie wird dem Tiefengestein Wärme entzogen. Dabei sind neben der Tiefe auch die Stoffeigenschaften des Gesteins maßgebend. Je größer die Rohdichte des Gesteins ist, desto mehr eingespeicherte Energie kann aus dem Tiefengestein entzogen werden.

Neben den jahreszeitlichen Einflüssen, die gerade im oberflächennahen Erdbereich spürbar sind, ist vorrangig die Art des Bodens maßgebend, wie hoch die Wärmeentzugsleistung sein kann. Die VDI 4640-3, Thermische Nutzung des Untergrundes – Unterirdische thermische Energiespeicher: 2001-06 gibt für unterschiedliche Böden stark abweichende Leistungspotenziale an, wenn der Wärmeentzug über Sonden erfolgt, die mit einer Wärmepumpe kombiniert sind:

- Untergrund mit hohem Grundwasserfluss 100 W/m
- Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit 80 W/m
- Festgestein mit normalem Untergrund 55 W/m
- Schlechter Untergrund wie lockere Sedimente 30 W/m.

Die oberflächennahe Geothermie, die bereits in Tiefen von 0,80 m möglich ist<sup>10</sup>, wird aufgrund des geringeren Temperaturniveaus des Erdreiches immer in Kombination zur Wärmepumpentechnik als Erdkollektor konzipiert. Kommen Erde-Wasser-Wärmepumpen im oberflächennahen Bereich zum Einsatz, unterliegt der Nutzungsgrad der Anlage starken jahreszeitlichen Schwankungen. Aufgrund des relativ geringen Temperaturniveaus des oberflächennahen Erdreiches sind zur effizienten Nutzung und Einbindung in eine

<sup>10</sup> vgl. [33], S. 495

Bodenart/Gesteinstyp	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ (empfohlener Rechenwert) [W/(m · K)]	Volumenbez. spezifische Wärmekapazität $\rho \cdot c_p$ [MJ/(m <sup>3</sup> · K)]
Tonschiefer	2,1	2,2–2,5
Gneis	2,9	1,8–2,4
Granit	3,2	2,1–3,0
Sandstein	2,8	1,8–2,6
Kalkstein	2,7	2,1–2,4
Ton-, Schluffstein	2,2	2,1–2,4
Lehm und Geschiebemergel	2,4	1,5–2,5
Sand feucht	1,4	1,6–2,2
Sand trocken	0,4	1,3–1,6

**Tab. 5:** Auszug von Gesteins- und Bodenarten und deren wärmetechnischen Eigenschaften nach VDI 4640-1, Tab. 1

Heizungsanlage relativ große Grundstückflächen notwendig. Nach Angaben des Bundesverbandes Wärmepumpen e. V. muss die mit Erdkollektoren belegte Fläche ca. 1,5 bis 2,0-fach größer sein als die zu beheizende Fläche. Die horizontal im Erdreich verlegten Wärmetauscherrohre sind in einem Abstand ab 50 cm untereinander als Erdkollektorenfeld zu verlegen. Je dichter die Wärmetauscherrohre verlegt werden, desto größer sind die gegenseitige Beeinflussung im Erdreich und die Auskühlung des Kollektorenfeldes.

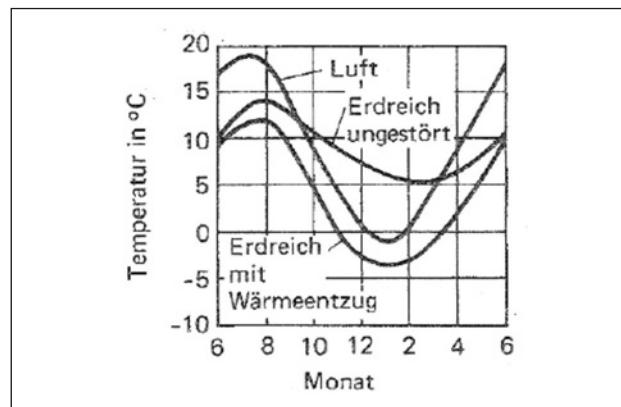
Tiefere Schichten im Erdreich werden mittels Erdsonden erschlossen. Bezogen auf die Länge der Sonden sind je Meter unterschiedliche Wärmentzugsleistungen in Abhängigkeit zur Bodenqualität möglich. Drusche gibt hierzu an:

- Trockener Kies und Sand 20–25 W/m Sondenlänge
- Wasserführende Kies oder Sandschicht 55–80 W/m Sondenlänge
- Kalkstein 45–70 W/m Sondenlänge
- Gneis, Granit 55–85 W/m Sondenlänge.

Die Wärmentzugsleistung kann vor Ort jedoch deutlich abweichen, wenn es eine starke Beeinflussung durch Grundwasser gibt. Die Temperatur des Grundwassers liegt im Jahressgang im Bereich zwischen 8°C und 10°C. An sehr kalten Wintertagen kann oberflächennahes Grundwasser jedoch auch einfrieren.

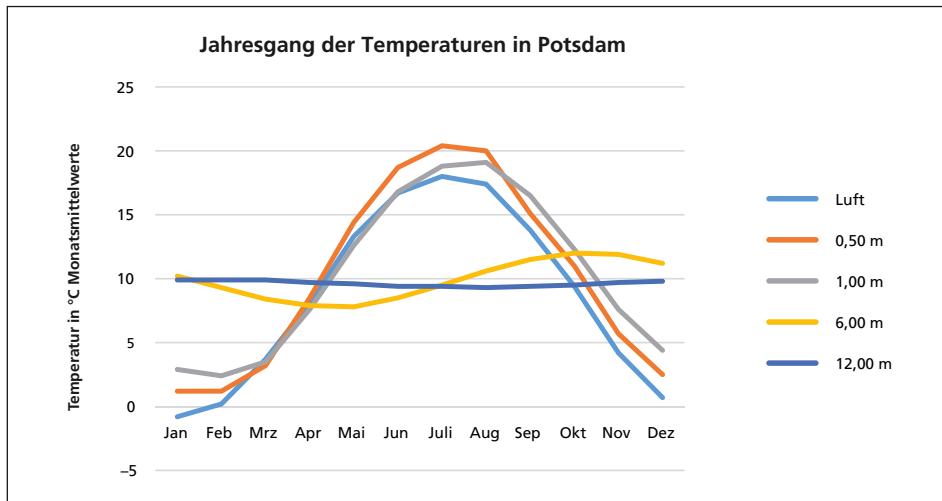
Damit das Erdreich durch die Wärmeentzugsleistung nicht zu stark ausköhlt, ist ein ausreichender Abstand untereinander und besondere Verlegearten zu berücksichtigen. Zusätzlich muss das Einfrieren des Erdreiches vermieden werden, um Schäden an tiefwurzelnden Pflanzen vorzubeugen. Hier können z.B. sternförmig verlegte Erdsonden zur Ausführung kommen, die schräg angebracht werden und deren Abstand untereinander mit der Tiefe ansteigt. Erdsonden sind im direkten Vergleich zu Erdkollektoren das teurere

**Abb. 45:** Ungefährer Verlauf der Lufttemperatur des ungestörten Erdreichs und des Erdreichs mit Wärmeentzug in ca. 1,50 m Tiefe im Jahresgang (Quelle: [33], S. 496).

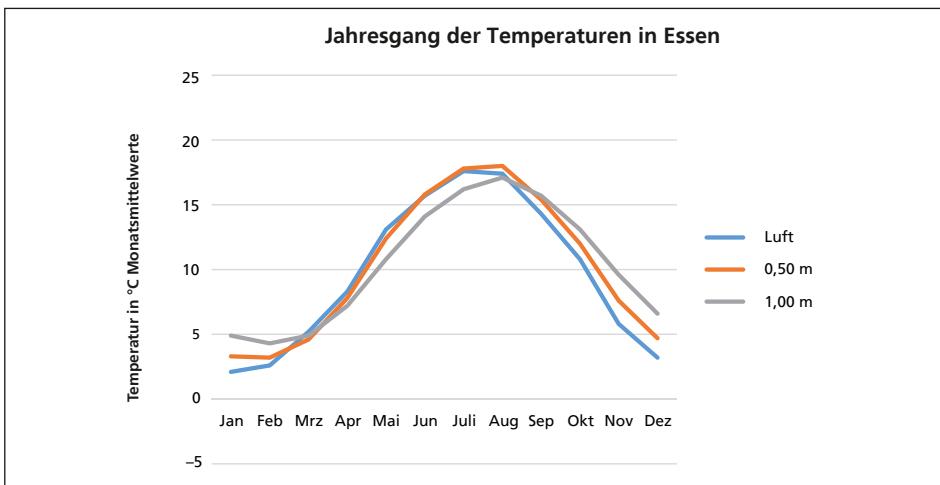


System. Da jedoch tiefere Schichten erschlossen werden, können über das gesamte Jahr gesehen höhere Wärmegewinne erzielt werden.

Zur Nutzung von Geothermie und Grundwasser sind die Vorgaben der DIN 8901:2002-12 »Schutz von Erdreich, Grund- und Oberflächenwasser« zu beachten. Im Rahmen der Planung ist im Genehmigungsverfahren die behördliche Zustimmung u.a. der Unteren Wasserbehörde einzuholen. Kommen Erdsonden mit Bohrungen zur Ausführung, die tiefer als 100 m sind, muss die Zustimmung des Ober-Bergbauamtes vorliegen.



**Abb. 46:** Jahresgang der Temperaturen im Erdreich in Potsdam nach DIN 4710. Bis 1 m Tiefe besteht das Erdreich aus sandigem Lehm. Ab 2 m wechselt die Zusammensetzung des Erdreichs auf kiesigen Sand. Die tabellierten Werte stammen aus einem Bereich, der im Winter ständig schneefrei gehalten wurde (Quelle: DIN 4710:2003-01).



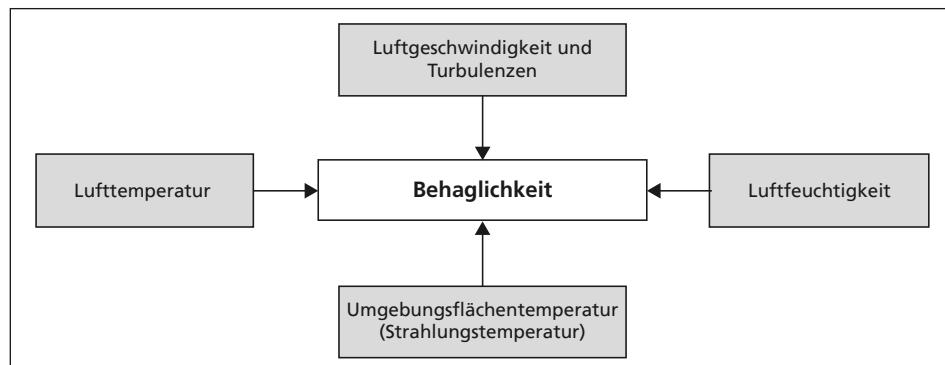
**Abb. 47:** Jahresgang der Temperaturen im Erdreich aus lehmigen Schluff in Essen (Quelle: DIN 4710:2003-01)

## 4 Behaglichkeit, Komfortanspruch und Raumhygiene

Im Mittelpunkt der Betrachtungen zu möglichen Wärmegewinnen und dem Energieerhalt muss natürlich der Mensch als Nutzer gesehen werden. Dabei gilt es optimale Aufenthaltsbedingungen, die nicht gesundheitsgefährdend sind und einen hohen Wohnkomfort gewährleisten, zu schaffen. Wie schon aufgezeigt, ist ein zu hoher Wärmegewinn aus Sonnenstrahlung im Innenraum unerwünscht. Ebenso müssen aber auch die Oberflächentemperaturen der raumschließenden Konstruktionen beachtet und geplant werden. Niedrige Oberflächentemperaturen von Bauteilen und zu kühle Räume sind nicht nur ein Problem der Behaglichkeit. Kalte Bauteile stellen ebenso ein hygienisches Risiko für den Nutzer dar, wenn es auf den Bauteilflächen zu einem Kondensatausfall kommt, der einen Schimmelpilzbefall nach sich zieht.

Betrachtet man die menschliche Eigenschaft Wärme wahrzunehmen, fällt auf, dass dies ebenfalls eine starke subjektive Ausprägung haben kann. Der menschliche Körper besitzt insgesamt ca. 250 000 Kältepunkte und 300 00 Wärmepunkte. Zusätzlich befinden sich Kälterezeptoren über die gesamte Haut verteilt. Ergänzt wird das menschliche Wärmeempfinden über Wärmerezeptoren, die im vorderen Stammhirn liegen. Diese Wärmerezeptoren regeln die körpereigene Temperatur. Das von einem Menschen als behaglich empfundene Temperaturfeld besitzt eine kleine Bandbreite und ist in Verbindung zur relativen Luftfeuchte zu sehen. Eine thermische Behaglichkeit liegt für den Menschen dann zum Beispiel vor, wenn dieser Bereich weder unter- noch überschritten wird.

Sinkt die Hauttemperatur unter 33 °C, setzt das Frostempfinden ein. Steigt die Stammhirntemperatur über 37 °C, beginnt unverzüglich Schwitzen zur Regulierung der Wärmeabgabe ein. Die Wärmeabgabe eines Menschen liegt bei ca. 11 % durch die Atmung, 26 % durch Verdunstung, 31 % durch Strahlung und 32 % durch die Konvektion der umgebenden Luft.<sup>11</sup> Das thermische Behaglichkeitsempfinden ist damit eigentlich eine



**Abb. 48:** Behaglichkeitsfaktoren

11 vgl. [5], S. 12, Bild 2.4

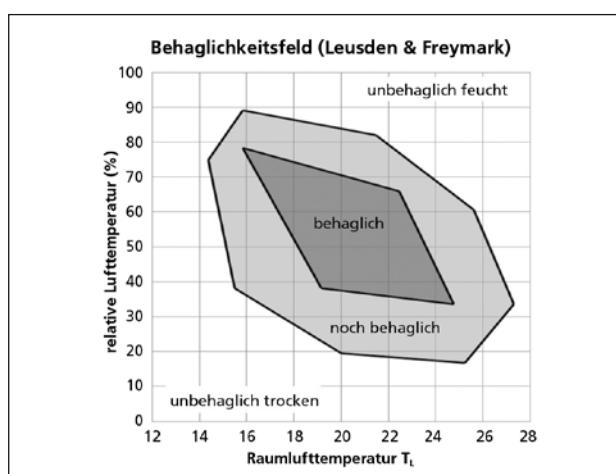
natürliche Schutzmaßnahme des menschlichen Körpers zur Erhaltung des lebensnotwendigen Wärmehaushalts.

Der Sollwert der menschlichen Kerntemperatur liegt bei 37 °C. Schon Veränderungen der Kerntemperatur von 1,5 K führen sofort zu einer Stoffwechseländerung, die um 20 % vom normalen Zustand abweichen kann. Daher ist es von gesundheitlicher Bedeutung, dass stabile Konditionen im Innenraum vorliegen. Tatsächlich ist es jedoch so, dass der Mensch nicht Temperaturen, sondern nur Temperaturunterschiede wahrnimmt. Daher ist die Ausführung aller raumumschließenden Konstruktionen maßgeblich an dem subjektiven Empfinden von Behaglichkeit beteiligt.

Die Behaglichkeit spiegelt das subjektive Wohlempfinden in einem Raum wieder. Da nie alle Personen das gleiche Empfinden haben, ist die Behaglichkeit keine absolut objektive Eigenschaft. Die Haupteinflussfaktoren auf die Behaglichkeit sind die Feuchtigkeit und Temperatur der Luft, die Oberflächentemperatur der umgebenden Wand-, Boden- und Deckenflächen. Zusätzlichen Einfluss hat die Bewegung von Luft. Aber auch Farben und Raumakustik beeinflussen das Empfinden und damit das subjektive Behaglichkeitsempfinden in einem Raum.

Im Vordergrund der Planung steht die Gewährleistung und Steigerung des Komforts in Abhängigkeit der thermischen Behaglichkeit. Da die Behaglichkeitskriterien sehr subjektiv sind, gibt es eigentlich kein »Richtig« und »Falsch«. Allerdings kann mittels zahlreicher Erfahrungswerte und Forschungsergebnisse auch die Behaglichkeit in einem gewissen Rahmen geplant werden. Eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten der vier genannten Behaglichkeitsfaktoren erzeugen je nach Randbedingungen immer andere thermische Behaglichkeitsverhältnisse.

Nach den Ermittlungen und Darstellungen nach Leusden und Freymark liegen die Behaglichkeitskriterien für den Menschen in relativ engen Grenzen. Zu diesen Kriterien werden die Luft- und Oberflächentemperatur, sowie die Raumluftfeuchte gezählt. Erweiterbar sind diese Kriterien um die Qualität der Raumluft, den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft und ob störende Luftströmungen vorhanden sind. Obwohl Leusden und Freymark dazu Bewertungsdiagramme entwickelt haben, muss tatsächlich auch immer in Betracht gezogen



**Abb. 49:** Behaglichkeitsfeld für den einfachen praktischen Gebrauch (Quelle: [28])

werden, dass zu einem bestimmten Anteil auch hier sehr personenbezogene Bewertungen vorliegen können. Die wesentlichen Faktoren zur thermischen Behaglichkeit beschrieb Fanger bereits in den 1970er Jahren. Dazu zählten jedoch nicht nur bauliche Komponenten, sondern der aktive Mensch wurde mit in die Betrachtungen einbezogen. Fanger zählte dazu:

- Raumlufttemperatur
- Luftfeuchte
- Luftgeschwindigkeit
- Temperatur der Umgebungsflächen
- Bekleidungsgrad der Anwesenden
- Aktivitätsgrad der Anwesenden

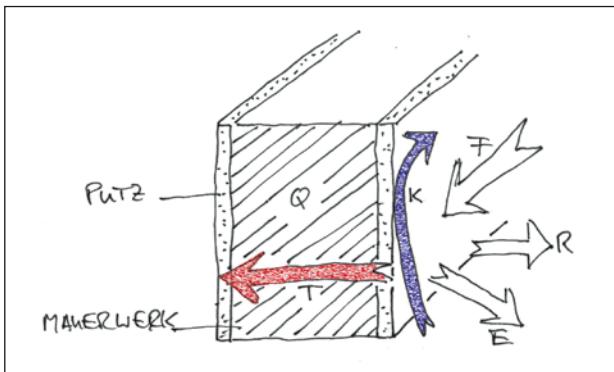
Das Raumklima ist damit das Ergebnis von vielen Faktoren, die sich alle gegenseitig beeinflussen. Neben den subjektiven Komponenten können die Eigenschaften eines Bauwerks, mit seinen stofflichen Eigenschaften, bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden. Aus der Anforderung, dass die Temperaturunterschiede zwischen Oberflächen und Raumluft nicht 4 K überschreiten sollen, weil dies vom Menschen als unangenehme Temperaturdifferenz (Strahlungskälte) empfunden wird, lassen sich Planungsempfehlungen zu den Konstruktionen ableiten.

## 4.1 Oberflächentemperaturen im Innenraum

Im Vordergrund der Betrachtungen stehen dazu die bauphysikalischen Eigenschaften, die ein ausgewogenes Verhältnis der unterschiedlichen Flächen untereinander sicherstellen sollen. Räume bzw. raumumfassende Konstruktionen werden als behaglich empfunden, wenn folgende Temperaturdifferenzen zwischen Bauteilloberflächen und Raumluft eingehalten werden:

- Zwischen Wandoberfläche zur Raumluft weniger als 4° K
- zwischen Fuß- und Kopfhöhe weniger als 3° K
- zwischen verschiedene Wandoberflächen (Strahlungsasymmetrien) 5° K

Eine zusätzliche und wesentliche Bedingung stellt die Luftgeschwindigkeit im Raum dar. Für die Aufenthaltsqualität ist entscheidend, dass Turbulenzen in der strömenden Luft gering sind, da es sonst zu Zugerscheinungen kommt. Am behaglichsten werden Räume empfunden, die in einem Bereich von 18°C bis 22°C Raumlufttemperatur, bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 65 %, liegen. Aus diesen Gründen ist, neben den Wärmegewinnen oder der Reduzierung von Wärmeverlusten, die Abstimmung des Schichtenaufbaus und insbesondere der raumseitigen Schicht in der Planung für die Aufenthaltsqualität von Bedeutung. Hier stellen gerade bestehende Konstruktionen ein großes Problem dar, was sich häufig, durch das Nutzerverhalten unterstützt, deutlich in bauphysikalischen bzw. hygienischen Mängeln zeigt.



**Abb. 50:** Anteile der Wärmestrahlung an Wandoberflächen

Die Materialeigenschaften Wärmespeicherfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit bilden die wesentlichen Bewertungskriterien zur Sicherstellung der behaglichen Raumbedingungen. Dabei sind zwangsläufig die Eigenschaften der unmittelbar an die Raumluft grenzenden Materialien von wesentlichem Interesse. Die tatsächliche Oberflächentemperatur auf der Innenseite einer Wand ist das Ergebnis unterschiedlicher und sich gegenseitig beeinflussender Randbedingungen bzw. Wärmestrahlnungen und Wärmeflüssen.

Wie in Abbildung 50 dargestellt setzen sich die Wärmestrome und Wärmestrahlung in und vor einer Wand aus unterschiedlichen Vorgängen zusammen:

- E emittierte Wärmestrahlung in [W]
- F empfangene Wärmestrahlung in [W]
- R reflektierte Wärmestrahlung in [W]
- K Konvektion der angrenzenden Luftsicht in [W]
- T Transmissionswärmestrom durch die Wand in [W]
- Q in der Wand eingespeicherte Wärme in [W]

Bei der Betrachtung der wärmeumhüllenden Umfassungsfläche hat jede Schwachstelle großen Einfluss auf die Behaglichkeit. Dieser Einfluss wird als mittlere Strahlungstemperatur  $\theta_{si,m}$  in K erfasst und kann über die angegebene Gleichung bestimmt werden.<sup>12</sup>

$$\theta_{si,m} = \frac{\sum (A_i \cdot \theta_{si,i})}{\sum A_i}$$

Dabei ist:

- $\theta_{si,m}$  mittlere Umgebungsflächentemperatur in [K]
- $A_i$  Oberfläche jedes einzelnen Bauteils in [ $m^2$ ]
- $\theta_{si,i}$  Umgebungsflächentemperatur jedes einzelnen Bauteils in [K]

12 vgl. 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

Die mittlere Strahlungstemperatur wird auch als operative Temperatur oder empfundene Raumtemperatur bezeichnet. Sie steht für eine Temperatur, die sich aus der Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur ergibt.

Dabei ist  $A_i$  die Oberfläche jedes einzelnen Bauteils der Raumumschließungsfläche. Darunter fallen auch Heizflächen, Fußböden und Innenwände und  $\theta_i$  die jeweilige Temperatur. Der Mittelwert bildet sich als Gewichtung in Abhängigkeit der Flächengröße. Der Mittelwert aus raumseitiger Lufttemperatur  $\theta_i$  und mittlerer Umgebungsflächentemperatur  $\theta_{si,m}$  wird als empfundene Temperatur  $\theta_f$  nach der folgenden Gleichung definiert.<sup>13</sup>

$$\theta_f = a \cdot \theta_i + (1-a) \cdot \theta_{si,m}$$

Dabei ist:

- a Faktor zur Beschreibung der Luftgeschwindigkeit (nach Tabelle 6)
- $\theta_i$  innenseitige Lufttemperatur in [K]
- $\theta_{si,m}$  mittlere Umgebungsflächentemperatur aller Bauteile in [K]

Die Betrachtungsweise der DIN EN 7730 zur Ergonomie der thermischen Umgebung erweiterte Glück um den Einfluss der Luftgeschwindigkeit. Da bei höheren Luftgeschwindigkeiten die Konvektionswärmeverteilung des Menschen ansteigt, wird die Lufttemperatur deutlicher wahrgenommen. Diese Temperatur ist eine fiktive Temperatur, welche als Maß für eine vom Menschen angenehm empfundene Temperatur dient.

Der Faktor a beschreibt die Luftgeschwindigkeiten v in der nachfolgenden Tabelle, wodurch eine Temperaturumwälzung in dem Raum stattfindet. Je höher die Luftgeschwindigkeit ist, desto geringer wird der Einfluss der mittleren Strahlungstemperatur, da eine größere Luftvermischung stattfindet, die eine einheitlichere fühlbare Temperatur herstellt. Für die Normaltemperatur von 20°C bis 22°C beträgt die zulässige Luftgeschwindigkeit etwa 0,15 m/s bis 0,2 m/s empfohlen. Somit kann die Strahlungstemperatur der Oberflächen und die raumseitige Lufttemperatur zu gleichen Teilen bei der Berechnung der gefühlten bzw. operativen Temperatur berücksichtigt werden.

**Tab. 6:** Faktor für Raumluftgeschwindigkeit  
(Quelle: [15], S. 77)

Luftgeschwindigkeit	a
0,0 m/s – 0,2 m/s	0,5
0,2 m/s – 0,6 m/s	0,6
0,6 m/s – 1,0 m/s	0,7

## 4.2 Materialien und Ansätze zur Behaglichkeitsbeurteilung

Üblicherweise werden heute intermittierende Heizungssysteme installiert, die ab einer festgelegten Uhrzeit im Verlaufe des Abends in die Nachtabsenkung gehen. Als Folge hieraus kühlen sowohl die Raumluft als auch die raumumfassenden Bauteile ab. Fällt die

13 vgl. [15], S. 77

Abkühlung zu hoch aus, steigt der notwendige Wärmeenergiebedarf zum Nachheizen nach der Nachtabsenkung. Zur Reduzierung dieser Effekte ist auch die Qualität von Wand, Decke und Boden, neben der Raumgröße, der Heizleistung, der Wärmeübertragung und des Luftwechsels, entscheidend. Eine positive Beeinflussung des Anheizvorgangs kann erreicht werden durch Baustoffe an der Oberfläche mit geringen wärmeleitenden Eigenschaften. Eine Bewertung ist hier möglich mittels des Wärmeeindringkoeffizienten  $b$ , der sich ermitteln lässt nach:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$$

Dabei ist:

- $b$  Wärmeeindringkoeffizient in  $[(W \cdot s^{0.5})/(m^2 \cdot K)]^{14}$
- $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit in  $[W/(m \cdot K)]$
- $c$  spezifische Wärmekapazität in  $[J/(kg \cdot K)]$
- $\rho$  Rohdichte in  $[kg/m^3]$

Dabei gilt je kleiner der Wärmeeindringkoeffizient  $b$  eines Stoffes ist, desto geringer ist die Wärmeleitung in das Bauteil und umso schneller erfolgt die Erwärmung der Bauteiloberfläche. Der Wärmeeindringkoeffizient  $b$  ist somit ein Maß zur Bewertung von Räumen und Konstruktionen. Mit diesem Wert lässt sich vorab ermitteln ob Räume kurzfristig schnell erwärmt werden können oder ob der Anheizvorgang langsam verläuft, weil die umgebenden Bauteile einen hohen Wärmeeindringkoeffizienten  $b$  besitzen.

Mit dem Wärmeeindringkoeffizienten lässt sich auf eine einfache Weise ermitteln, welche Kontakttemperatur entsteht und wie diese vom Nutzer empfunden wird.

Die Kontakttemperatur ergibt sich aus folgender Formel<sup>15</sup>:

$$t_k = \frac{b_1 \cdot t_1 + b_2 \cdot t_2}{b_1 + b_2}$$

Ein einfaches Beispiel zeigt, wie die Folgen des Wärmeeindringkoeffizienten für den Menschen spürbar werden. Mit der Berührung eines Marmorbodens [ $b = 2,5 \text{ W}/(m^2 \cdot s^{0.5})$ ] oder eines Holzbodens [ $b = 0,5 \text{ W}/(m^2 \cdot s^{0.5})$ ] setzt ein Wärmestrom vom Menschen in das Bauteil ein. Für die Betrachtung wird für den Fuß eine Oberflächentemperatur von  $30^\circ\text{C}$  angenommen. Der Wärmeeindringkoeffizient der menschlichen Haut liegt zwischen 1,0 bis 1,3  $\text{W}/(m^2 \cdot s^{0.5})$ . Für die Oberflächentemperatur der Böden wird von einem eingeschwungenen Zustand von ca.  $18^\circ\text{C}$  ausgegangen. Auf der Grundlage dieser Werte ergibt sich eine Oberflächentemperatur auf dem Holzboden von ca.  $26,2^\circ\text{C}$ . Unter gleichen Randbedingungen stellt sich für den Marmorboden dagegen nur eine Temperatur von ca.  $21,6^\circ\text{C}$  ein. Da die Abweichung zur menschlichen Kerntemperatur in diesem Fall größer ist, wird dies deutlich als kühlerer Boden empfunden. Zugleich zeigt dies aber auch

14 bzw. nach DIN EN ISO 7345:1996-01 Wärmeschutz – Physikalische Größen und Definitionen; Pkt. 2.1.7 b in  $J/(m^2 \cdot K \cdot s^{0.5})$

15 vgl. [33], S. 175

Material	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeeindringkoeffizient b [kJ/m <sup>2</sup> h <sup>0,5</sup> K]
Glaswolle	100	0,055
Holz (Fichte)	500	0,10
Holzfaserplatten	300	0,18
Kork	100–220	0,16–0,24
Ziegelmauerwerk	1800	1,2–1,4
Floatglas	2 500–2 600	1,3–1,5
Estrich	2 000	1,5
Fliesen	2 300	
Beton	2 200	1,5–1,7
Stahl	7 800	14
Kupfer	8 900	36

**Tab. 7:** Beispiele zur Dichte und zum Wärmeeindringkoeffizienten üblicher Materialien. Ein hoher Wärmeeindringkoeffizient steht für eine hohe Wärmespeicherfähigkeit des Stoffs. Ein kleiner Wärmeeindringkoeffizient zeigt dagegen, dass der Stoff langsamer Wärme aufnimmt und bei direkter Berührung mit der Hand als relativ warm erscheint.

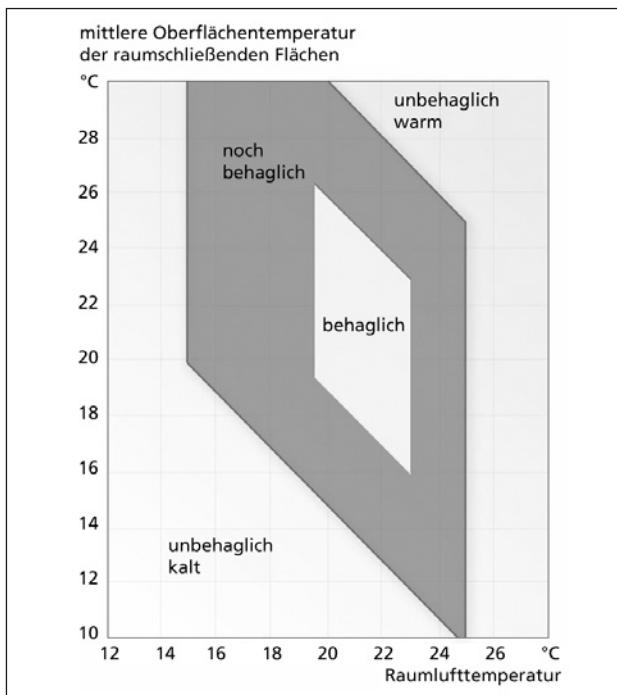
auf eine einfache Weise, wie Wärmeströme erlebbar sein können und durch die Materialwahl beeinflussbar sind.

Die Beeinflussung der Oberflächentemperaturen durch die Veränderung des Schichtenaufbaus von Wandbelegen, zeigt die Dissertation von Siebel mit dem Titel »Effiziente Anheizung von Gebäuden in massiver Bauweise bei intermittierender Beheizung« [38].

In dieser Arbeit wurden in einem Prüfstand einfache Wände aus 17,5 cm Kalksandstein verputzt und mit unterschiedlich starken und thermisch wirksamen Vliesen belegt. Zur Ausführung kamen drei verschiedene Vliese der Firma Erfurt (BasicVlies Plano) mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,04 W/(m · K) und in den Schichtstärken 1,2 mm, 2,4 mm und 3,6 mm. Alle drei Vliese zeigten in den Versuchen und im Vergleich zu einem Wandaufbau ohne Vliesbeschichtung eine deutlich schnellere Erhöhung der Oberflächentemperaturen beim Anheizen nach der Nachabsenkung der Heizung in dem Testraum. Nach Siebel erreicht die normale Wand nach der Nachabsenkung auf 17 °C erst nach 3,6 h eine Oberflächentemperatur von 19 °C. Eine Temperatur von 20 °C wird unter Testbedingungen mit der Wand ohne Vlies nicht erreicht. Mit dem Einbau der Vliese verbessert sich die thermische Situation. 19 °C Oberflächentemperatur werden mit dem 3,6 mm Vlies bereits nach 1,6 h Stunden erreicht und 20 °C nach 15,1 h.<sup>16</sup>

Eine weitere Untersuchung zur Entwicklung der Raumlufttemperatur von Siebel zeigt, wie sich der Auftrag eines Vlieses mit 4,0 mm Schichtstärke unterhalb einer Raufaser-

<sup>16</sup> vgl. [38], Abbildung 7.4 und Tab. 7.4



**Abb. 51:** Behaglichkeitsfeld  
(Quelle: [12])

tapete gegenüber einer einfachen Wand entwickelt, die nur mit Raufaser beklebt ist. Ausgehend von einer Raumlufttemperatur von 17,5 °C werden im Anheizvorgang bereits 20 °C erreicht, wenn die raumschließenden Wände mit der 4,0 mm starken Vliesschicht ausgeführt wurden. Demgegenüber werden 20 °C bei der Wand mit Raufaser ohne Vlies erst nach >60 Minuten erreicht:<sup>17</sup>

Diese in der Dissertation von Siebel veröffentlichten Ergebnisse zeigen, dass bereits mit einfachen Mitteln Verbesserungen hinsichtlich der Behaglichkeitskriterien, der Raumluft- und Oberflächentemperaturen möglich sind und sich daraus auch eine Reduzierung des Heizwärmebedarfs ableiten lässt. Aufgrund der dämpfenden Eigenschaften des Dämmvliestes ist ebenso auch unter sommerlichen Bedingungen mit besseren Innenraumverhältnissen zu rechnen.

Um eine für die Mehrzahl der Raumnutzer optimale thermische Behaglichkeit zu schaffen, muss die Wärmeabgabe des menschlichen Körpers im Gleichgewicht mit seiner Wärmeproduktion sein. Daraus wird die Fangersche Behaglichkeitsgleichung abgeleitet. Diese stellt eine Beziehung her zwischen der Aktivität, der Kleidung, sowie den Bestimmungsgrößen der thermischen Umgebung.

In dem nachfolgend dargestellten Behaglichkeitsfeld liegen alle möglichen Kombinationen einer als behaglich empfundenen Umgebung, da die Einflussfaktoren auf die Behaglichkeit eine gewisse Bandbreite ermöglichen.

17 vgl. [38], Abbildung 7.6 und Tab. 7.6

Die genaue rechnerische Beschreibung des Behaglichkeitsempfindens stellt sich aufgrund der vielen variierenden Einflussfaktoren als schwierig dar. An dieser Stelle sei für weiterführende Informationen auf andere Quellen verwiesen. Für einen Planungsprozess sollte daher jedoch immer die leicht erfassbare Temperatur der wärmeumhüllenden Umfassungsfläche berücksichtigt werden. Die Betrachtung der Behaglichkeit bildet nur ein Randkriterium, welches jedoch nicht außer Acht gelassen werden sollte.



## 5 Grundlagen der Materialeigenschaften

Materialien bilden die Grundlage aller Baustoffe und Gebäude. Jedes Material besitzt dabei spezifische Eigenschaften, die im Rahmen der Planung genutzt werden können, um bestimmte Ergebnisse in der Nutzung zu unterstützen. Damit bilden die Kenntnisse um Materialien eine wesentliche Grundlage für den Planer, wenn man ressourceneffizient und nachhaltig bauen möchte. Dabei stehen jedoch nicht nur die technischen Kennwerte im Vordergrund, sondern ebenso der Energiebedarf bei der Produktion, die Anforderungen an den Unterhalt und die Möglichkeiten des Recyclings.

Zusätzlich können mit den Baustoffen und Bauteilen bestimmte thermische Effekte erreicht werden, die auch energetische Auswirkungen haben können und die Bilanzierungen im winterlichen wie im sommerlichen Wärmeschutz beeinflussen.

Mit der Lebenszyklusanalyse stehen nicht nur die stofflichen Eigenschaften und Wartungsintervalle von Bauteilen im Mittelpunkt der Betrachtung. Vielmehr wird der Energieeinsatz über alle Phasen eines Gebäudes bewertet, also beginnend mit der Herstellung und dem Energieaufwand bei der Produktion des Baustoffs, über den Transport zur Baustelle, der Bauausführung selbst, der Nutzungsphase bis zur Demontage bzw. Abbruch und Wiederverwertung als Rohstoff. Dabei ist auffallend das der Großteil des Energieverbrauchs in der Herstellungsphase anfällt.

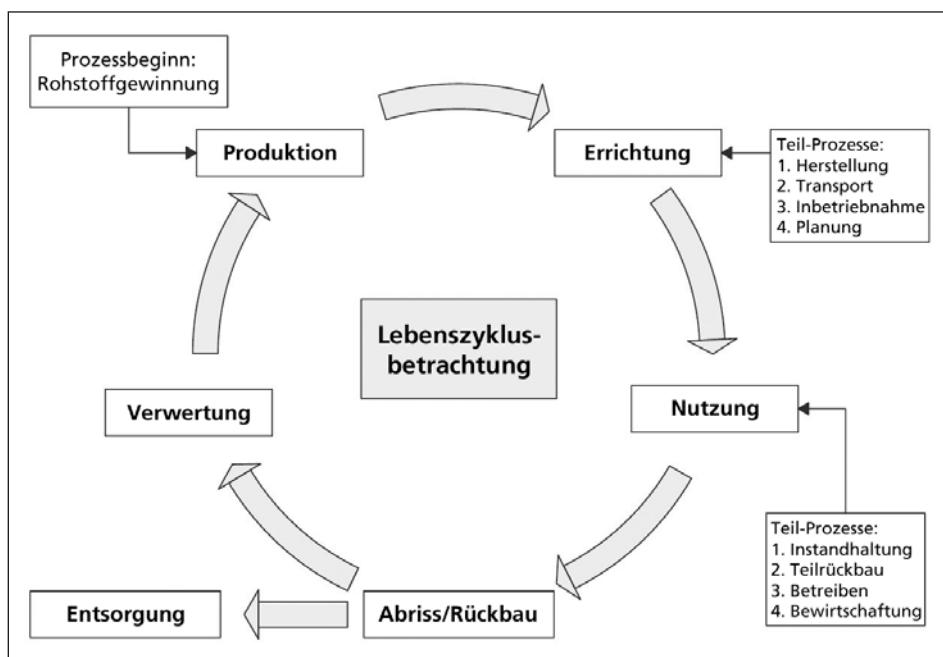


Abb. 52: Faktoren der Gebäude-Lebenszyklusbetrachtung eines Gebäudes mit allen seinen Teilen

## 5.1 Reflexion, Absorption und Albedo

Alle Körper empfangen masselose Strahlung, die zum Teil reflektiert oder absorbiert wird. Der nicht reflektierte Teil dringt in den Körper ein, wird absorbiert, in Wärme umgewandelt und als langwellige Strahlung von den Körpern zurückgeworfen. Dieser Vorgang steht im unmittelbaren Zusammenhang zu den Stoff- und Oberflächeneigenschaften des Materials. Zur Beschreibung dieser Eigenschaften werden die Begriffe Reflexion, Absorption, Absorptionsgrad, Emissionsgrad oder Albedo genutzt. Allen diesen Eigenschaften lassen sich materialspezifische Werte zuordnen, die zur Bewertung herangezogen werden und in ein energetisches Konzept eingebunden werden können.

Die Albedo beschreibt das Maß der »Weißheit« und damit das Rückstrahlungsvermögen einer Oberfläche. Voraussetzung ist, dass diese Fläche selbst nicht leuchtet, sondern nur reflektiert.

Bestimmt wird der zwischen 0 und 1 liegende Wert aus dem Quotienten von reflektierter zu einfallender Lichtmenge. Eine Oberfläche mit einer vollständigen Rückstrahlung hätte somit den Wert 1. Durch die Art der unterschiedlichen Oberflächen beeinflusst die Albedo die Luftherwärmung und damit die Strömungen von Luft. Konvektion findet dabei immer im Zusammenhang mit der Wärmeleitung statt. Die Stoffeigenschaft Albedo hat somit wesentlichen Einfluss auf die Bewertung möglicher solarer Gewinne. Terrestrische Oberflächen, wie z.B. Wiesen und Laubwälder haben einen Albedo-Wert von 0,18. Im Vergleich dazu liegt die Albedo der Wasseroberfläche eines Meeres bei 0,40 und 0,80 bei einer frischen Schneedecke, jeweils bei senkrechter Sonne.

Die für Dächer von Gebäuden häufig benutzten Schieferplatten<sup>18</sup> haben in Abhängigkeit zur ihrer Herkunft und farblichen Qualität eine Albedo von 0,10 bis 0,14 angegeben.

### Absorptionsgrad $\alpha_s$ aus Solarstrahlung und Emissionsgrad $\varepsilon$

Material	$\alpha_s$	$\varepsilon$	$\alpha_s/\varepsilon$
Aluminium poliert	0,20	0,08	2,50
Kupfer, poliert	0,18	0,03	6,00
Kupfer, oxidiert	0,70	0,45	1,56
Farbe, zinkweiß	0,22	0,92	0,24
Farbe, schwarze Ölfarbe	0,90	0,92	0,98
Eisen, rau	0,75	0,82	0,91
Schiefer	0,88	0,91	0,97
Ziegel, rot	0,75	0,93	0,81

**Tab. 8:** Vergleich einiger Baustoffe bezüglich ihres Absorptionsgrads aus Solarstrahlung und ihres Emissionsgrads (Quelle: [2], S. 633).

18 vgl. VDI 3789 Blatt 2, Anlage E, Tabelle E4

Bedeutend für die solartechnische Anwendung ist das Verhältnis von Solarstrahlung  $\alpha_s$  und dem Emissionsgrad  $\varepsilon$  der Oberfläche eines Materials. Für Solarkollektoren sollen die Verhältniswerte hoch sein und die Verluste aus Reflexion, bzw. Rückstrahlung gering. Das Vermögen Wärmestrahlung zu emittieren wird daher mit dem Emissionsgrad  $\varepsilon$  dargestellt.<sup>19</sup>

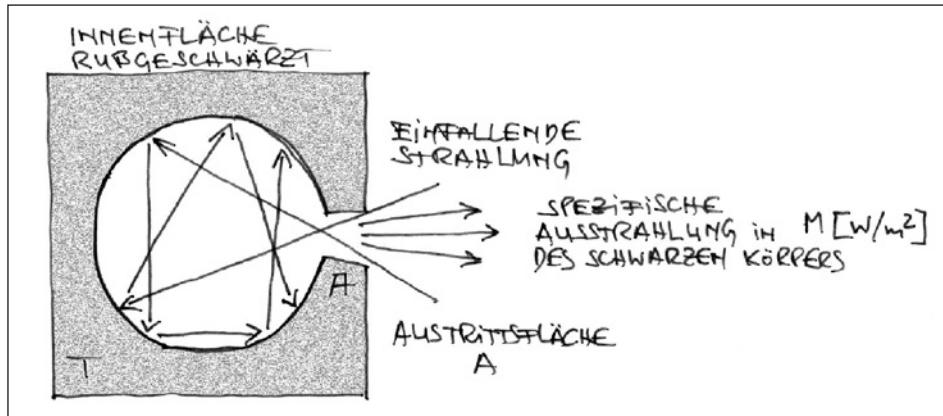
Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  von Baustoffen ist immer  $< 1$ , da reale Körper nie die komplette Energie aufnehmen können und immer ein Teil als Reflexion abgegeben wird. Für die Baukonstruktion ist das Verhältnis von  $\alpha_s/\varepsilon$  bedeutend. Sollen Bauteiloberflächen eine geringe Temperatur unter solarer Bestrahlung annehmen, muss  $\alpha_s/\varepsilon$  klein sein.

Diese Verknüpfung von den Emissions- und den Absorptionsgraden von realen Körpern, die sich im thermischen Gleichgewicht befinden, beschrieb 1859 erstmals Kirchhoff mit dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz. Dieses Strahlungsgesetz beschreibt den Zusammenhang, dass sich eine schwarze Fläche im Sonnenlicht stärker erwärmt als eine weiße Fläche, aber auch ebenso Wärme, in Form von Strahlung, leichter wieder abgibt.

Nach Kirchhoff emittiert der Schwarze Körper bei jeder Wellenlänge und in jeder Richtung des Halbraums die gesamte Strahlungsenergie. Daraus folgt, dass bei einem »Schwarzen Strahler«  $\varepsilon=1$  ist. Aus dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz resultiert der »Schwarze Strahler«, der als ein idealisierter Strahler gedacht ist und alle auftretenden Strahlungen absorbiert. Materialeigenschaften bleiben bei dem Schwarzen Strahler unberücksichtigt. Damit ist der Schwarze Körper ein hypothetischer Körper, der jedoch in Bezug auf Baustoffe nie vorliegt. Baustoffe, als reale Körper sind daher sogenannte »Graue Strahler«, da  $\varepsilon=1$  nicht erreicht wird. Es erfolgen weder Absorption noch Emission komplett.

Reale Körper oder Graue Strahler können in keinem thermischen Zustand mehr thermische Strahlung aussenden als der Schwarze Strahler.

Über diese Eigenschaften kann aus dem Absorptionsgrad der Emissionsgrad berechnet werden. Da reale Körper immer weniger Strahlung emittieren, kann eine Verbindung



**Abb. 53:** Modellvorstellung eines Schwarzen Strahlers, der im Strahlungsaustausch mit der Umwelt steht. In dem Körper liegt eine absolute bzw. konstante Temperatur vor.

19 vgl. [7], S. 17

des Schwarzen Strahlers und eines realen Gegenstands über das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz wie folgt hergestellt werden.

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M_{\text{real}}}{M_{\text{schw. Körper}}} = \frac{\alpha}{\alpha_s}$$

Dabei ist:

$\varepsilon$	Emissionsgrad eines realen Körpers
$M_{\text{real}}$	Strahlungsemision eines realen Körpers in $[\text{W}/\text{m}^2]$
$M_{\text{schw. Körper}}$	Strahlungsemision eines Schwarzen Strahlers in $[\text{W}/\text{m}^2]$
$\alpha$	Absorptionsgrad eines realen Körpers
$\alpha_s$	Absorptionsgrad eines Schwarzen Strahlers

Aus der Tatsache, dass der Schwarze Strahler einen Absorptionsgrad von  $\alpha_s = 1,0$  hat, lässt sich für die praktische Anwendung das Strahlungsgesetz mit der nachfolgenden Gleichung vereinfacht zusammenfassen.

$$1 = \varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda)$$

Der Emissionsgrad ( $\varepsilon$ ) ist ein Maß für die Fähigkeit eines Materials, Infrarot-Strahlung auszusenden. Dabei hängt  $\varepsilon$  von der Oberflächenbeschaffenheit, dem Material und von der Temperatur des Messobjektes ab. Der maximale Emissionsgrad von  $\varepsilon = 1,0$ , wie es bei einem Schwarzen Strahler vorausgesetzt wird, kann in der Realität nicht auftreten, da es immer Anteile von reflektierter Strahlung und Transmissionsstrahlung gibt. Der Rechenwert von 100 % emittierter Strahlung dient somit nur als Beurteilungsmaßstab.

Der Reflexionsgrad ( $\rho$ ) beschreibt die Eigenschaft und den Fähigkeitsgrad einer Bauteiloberfläche bzw. eines Materials Infrarot-Strahlung reflektieren zu können. Das Reflexionsvermögen wird häufig auch als Albedo bezeichnet. Zusammengefasst nehmen folgende Faktoren Einfluss auf den Reflexionsgrad:

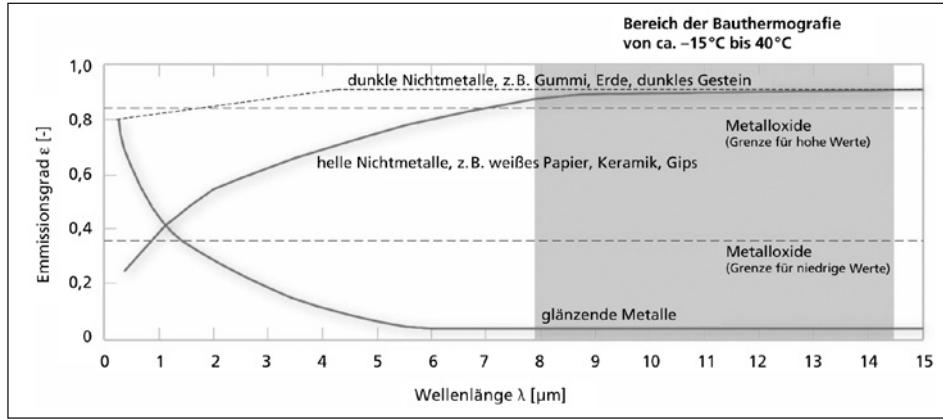


Abb. 54: Emissionsgrade von verschiedenen Stoffen (Quelle: [11])

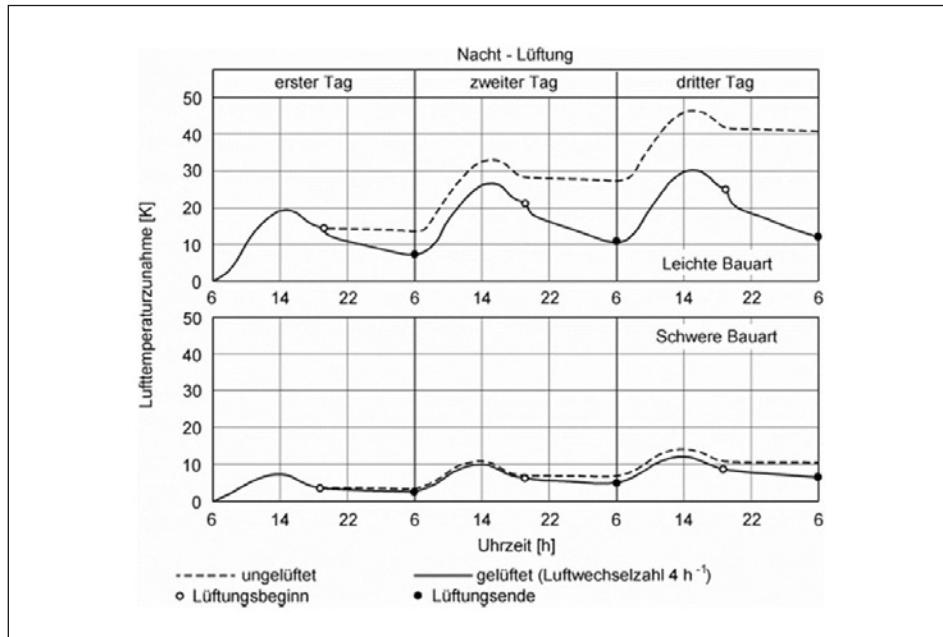
- Oberflächenbeschaffenheit, Temperatur und der Art des Materials.
- Glatte und polierte Oberflächen reflektieren stärker als rau, matte Oberflächen des gleichen Materials.

## 5.2 Einfluss der Innenwandkonstruktion auf den Wärmefluss

Wie im Vorkapitel beschrieben stellen die beiden baustoffbezogenen Eigenschaften, Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität, die Hauptbedingungen zur energetischen Bewertung.

Hinsichtlich der Anforderungen an den winterlichen Wärmeschutz ist die Wärmeleitfähigkeit von Bedeutung. Diese Eigenschaft bildet die Grundlage zur Bewertung von Transmissionswärmeverlusten.

Eine Bewertung der Wärmespeicherkapazitäten findet dagegen nur noch hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes statt, da diese Stoffeigenschaft besonders unter intermittierenden Bedingungen (wie im Sommer) von Interesse ist. Unter winterlichen Bedingungen ist die Bedeutung der Wärmespeicherkapazität, wie bereits von Künzel beschrieben, aufgrund der Veränderungen der Heizsysteme und des Heizverhaltens von geringem Interesse, da durch den Betrieb von Zentralheizungen im Grunde stationäre Verhältnisse vorliegen.<sup>20</sup>



**Abb. 55:** Die Erwärmung von Räumen infolge Sonneneinstrahlung durch Fenster (Quelle: [14])

20 vgl. [25], S. 3–8

<b>Technische Werte üblicher wandbildender Baustoffe</b> nach DIN 4108-4:2013-2 und DIN 10456:2010-05			
Baustoff	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_R$ [W/(m·K)]	Rohdichte [kg/m³]	Spezifische Wärmespeicherkapazität $C_p$ [J/(kg·K)]
<b>Wandbaustoffe</b>			
Kalksandstein	0,50–1,3	1 000–2 200	1 000
Planziegel – Passivhaus <sup>1</sup>	0,06	500	
Porenbeton	0,11–0,31	350–1 000	1 000
Stahlbeton	1,15–2,5	1 800–2 400	1 000
Spanplatten	0,10–0,18	300–900	1 700
Lehm	0,14–1,1	500–2 000	2 400
Keramische Platten	1,3	2 300	840
<b>Putze</b>			
Kalk und Kalkzementputz	1,00	1 800	1 000
Gipsdämmputz	0,7	600	1 000
Gipsputz	0,40	1 000–1 300	1 000
<b>Dämmstoffe</b>			
EPS	0,036–0,06	10–50	1 450
XPS	0,031–0,054	20–65	1 450
Schaumglas	0,046–0,066	100–150	1 000
Mineralwolle <sup>2</sup>	0,036–0,060	10–200	1 030
Hanf	0,04	30–42	2 300
Holzfaserdämmstoff	0,039–0,073	55	2 100
Zellulosedämmplatte <sup>3</sup>	0,039	70	2 000
Strohballendämmung	0,052–0,080	85–115	
Lehm Innendämmplatte	0,043 <sup>4</sup>	175	2 100

<sup>1)</sup> Planziegel MZ 60, Fa. Lücking

<sup>2)</sup> Bemessungswerte  $\lambda^b$  nach DIN 4108-4, Tab.2

<sup>3)</sup> vgl. Homatherm-Dämmstoffe aus Holz und Zellulose

<sup>4)</sup> vgl. Agaton Lehm, Produktdatenblatt  $\lambda_D$

**Tab. 9:** Übersicht üblicher wandbildender Baustoffe, technische Werte nach DIN 4108-4:2013-02

Demgegenüber bleibt der Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit hinsichtlich der Bewertung zum sommerlichen Wärmeschutz weiterhin von Interesse, da hier keine stationären Verhältnisse vorliegen und sich Räume über den Tag unterschiedlich erwärmen und über Nacht unterschiedlich ihre Wärmelast abgeben. Dieser Vorgang wird maßgeblich von der Konstruktionsweise und dem Raumluftvolumen mitbestimmt. Hauser zeigte hierzu bereits welchen Einfluss leichte oder schwere Konstruktionen auf diese Vorgänge haben.<sup>21</sup>

Die Untersuchungen von Gertis unter sommerlichen Bedingungen zeigten, dass die schwere Bauart mit einer höheren Trägheit reagiert. Während im Modelraum mit einer leichten Konstruktion schon nach dem ersten Tag eine Zunahme der Lufttemperatur von 20 K nach acht Stunden vorliegt, erhöht sich im gleichen Zeitraum die Raumluft in einem Modelraum aus schweren Materialien um nur 10 K. Hier zeigt sich der ausgleichende und damit positive Einfluss schwerer Konstruktionen auf das Innenraumklima. Ein ähnliches Bild lässt sich auch unter winterlichen Bedingungen ableiten, wenn schwere Konstruktionen bzw. Baustoffe mit einer hohen spezifischen Wärmespeicherkapazität direkt beschienen werden. Für die praktische Anwendung ist die Bewertung der volumenbezogenen Wärmespeicherkapazität über die nachfolgende Formel sinnvoll:

$$s = \rho \cdot C_p$$

Dabei ist:

$s$  Wärmespeicherwert in  $[J/(m^3 \cdot K)]$

$C_p$  spezifische Wärmespeicherkapazität mit  $[J/(kg \cdot K)]$

$\rho$  Rohdichte des Baustoffs in  $[kg/m^3]$

### 5.2.1 Wärmegewinne bei opaken Bauteilen

Die Oberflächentemperaturen auf Bauteilen sind das Ergebnis wechselnder Bedingungen der Umgebung. Diese werden bestimmt von unterschiedlichen Einflüssen:

- Leitfähigkeit des Materials
- Albedo der Oberflächenstruktur
- Absorptionsvermögen des Materials
- Beschaffenheit der Oberfläche, z. B. farbige Beschichtungen
- Windgeschwindigkeit
- Konvektion
- Regen
- Art der Sonnenstrahlung, direkt oder diffus
- Wärmerückstrahlung

Einen wesentlichen Einfluss auf die Wärmegewinne hat dabei unter anderem die Art der farbigen Beschichtung einer Fläche. Dazu veröffentlichte Akbari 2007 die ermittelten Oberflächentemperaturen an unterschiedlich farbigen, jedoch ansonsten gleichen

<sup>21</sup> vgl. [16], S. 308–312

Musterflächen<sup>22</sup>. Die ermittelten Werte zeigen eine Temperaturdifferenz von 39 K zwischen einer weiß oder schwarz lackierten Fläche:

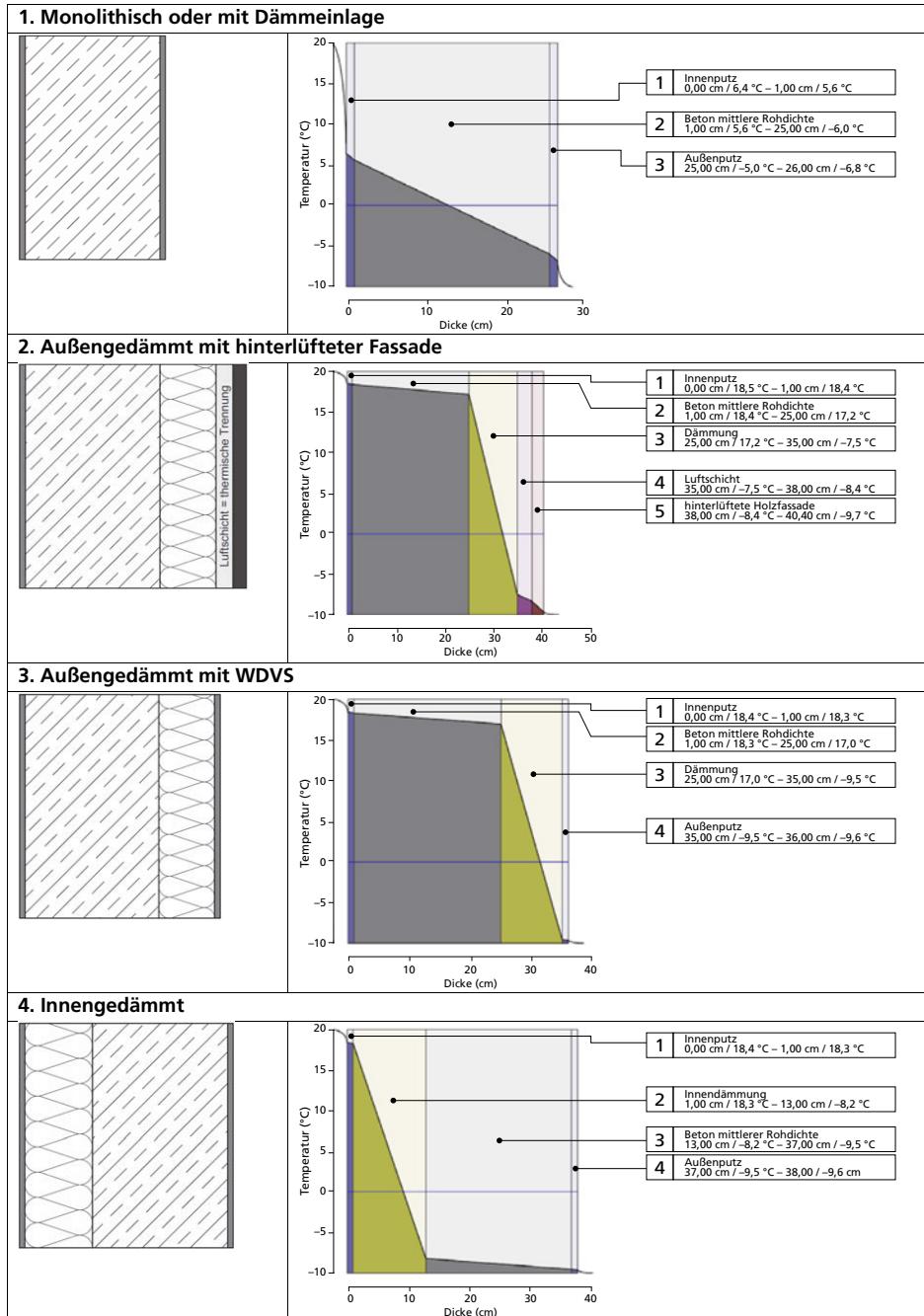
• weißer Lack	ca. 10 °C solarer Absorptionsgrad ca. 0,18
• weißer Zementauftrag	ca. 19 °C solarer Absorptionsgrad ca. 0,29
• alle Dachbeläge	ca. 32 °C solarer Absorptionsgrad ca. 0,46
• hellgrüner Lack	ca. 27 °C solarer Absorptionsgrad ca. 0,50
• verzinkter Stahl	ca. 47 °C solarer Absorptionsgrad ca. 0,65
• grüne Bitumen-Dachschindeln	ca. 42 °C solarer Absorptionsgrad ca. 0,85
• schwarzer Lack	ca. 49 °C solarer Absorptionsgrad ca. 0,98

Tatsächlich müssen zur Bewertung möglicher Wärmegewinne bei opaken Bauteilen die Konstruktionsweisen von Wand und Dach ganzheitlich betrachtet werden. Vereinfachend kann man dabei von drei grundlegenden Konstruktionsprinzipien im Wandbereich ausgehen. Diese sind die monolithische Wand, zu der auch Außenwände mit hochgedämmten Steinen gezählt werden können, die Außenwand mit einer hinterlüfteten Fassade und Dämmung zwischen Luftsicht und tragender Wand, sowie die Außenwand mit außenseitiger Dämmung und Putz als Wärmedämmverbundsystem.

Bei den Dachkonstruktionen können als übliche Bauweise das Kalt- und Warmdach gelten, die im Prinzip den Wandsystemen 2 und 3 der Abbildung 56 entsprechen. Die in Abbildung 56 dargestellten üblichen Wandkonstruktionen und deren Temperaturverläufe sind unter den normativen Randbedingungen mit einer Innentemperatur 20 °C und einer Außentemperatur von –10 °C untersucht worden. Weiterhin kann der Temperaturnullpunkt in den Zeichnungen abgelesen werden, welcher für Installationen oder Einbauten zu berücksichtigen ist. Auffällig hierbei ist insbesondere bei dem Temperaturverlauf der Innendämmung, dass die komplette massive Wandkonstruktion deutlich unter der Frostgrenze liegt.

Werden die außenseitigen Flächen der Konstruktion durch solare Einstrahlung erwärmt, stellt sich ein Wärmestrom in das Bauteil ein. Dabei hängt der Grad der Oberflächenerwärmung von mehreren sich gegenseitig beeinflussenden Faktoren ab. Neben der Beschaffenheit der Oberfläche bzw. dem Absorptionsvermögen und dem Emissionsgrad hängt die vorhandene Stärke der Globalstrahlung dabei besonders von dem Anteil der direkten Strahlung, dem Temperaturniveau der umgebenden Luft, den Windverhältnissen sowie dem Aufbau der Konstruktion und der Ausrichtung der Fläche zur Sonne, also dem Azimut, ab. Zudem hat jedoch auch noch das vorhandene Temperaturgefälle in der Konstruktion einen wesentlich Einfluss auf den Wärmefluss. Liegen hohe Unterschiede zwischen der Innen- und Außenseite vor, bekommt der Gradient einen hohen Stellenwert für den Wärmefluss. Entspricht die raumseitige Temperatur der Außenseite kommt der Wärmefluss zum Erliegen. Die Bedeutung der solaren Erwärmung für die Konstruktion reduziert sich spürbar. Dieses Verhalten entspricht dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, der besagt, dass Wärme von einem Stoff mit höherer Temperatur zu einem Stoff mit geringerer Temperatur fließt. Grundsätzlich kann dabei gelten, dass die transportierte Wärmemenge umso größer ist, wenn hohe Temperaturunterschiede vorliegen.

22 vgl. [1], S. 44



**Abb. 56:** Vereinfachte Darstellung üblicher Wandkonstruktionen mit Temperaturverläufen in den Bauteilschichten

## 5.2.2 Wärmedurchgang und Phasenverschiebung

Der Wärmedurchgang von der äußeren Oberfläche durch Wand- oder Dachkonstruktionen zur Rauminnenseite wird geprägt von der Phasenverschiebungen und der Temperaturamplitudendämpfung.

Heimke gibt für die Phasenverschiebung bei einer massiven Außenwand eine zeitliche Verzögerung von 6 bis 10 Stunden an, in Abhängigkeit zur Ausrichtung der Wandfläche, allerdings ohne einen detaillierten Bezug zur Wandstärke und Materialqualität aufzuzeigen.<sup>23</sup>

Neben der zeitlichen Verzögerung des Wärmedurchgangs von innen nach außen erfolgt eine Dämpfung der Temperaturamplituden. Das heißt im Verlauf des Wärmedurchgangs führt die Dissipation im Bauteil zu einer Reduzierung. Die von außen empfangene Wärme wird dabei nicht durchgeleitet sondern verbleibt im Bauteil.

Da die Außentemperatur und die Bestrahlungszustände im Tagesgang schwanken, werden ein maximaler Wert nur zur Mittagstunde und der geringste Wert im Laufe der Nacht erreicht. Daher entspricht die Schwingungsbreite dieser Sinusfunktion einem Tag bzw. 24 Stunden. Damit treten auf der Innenseite Schwankungen bei der Oberflächentemperatur auf. Diese sind auch in Abhängigkeit zur Konstruktion bzw. den bauphysikalischen Eigenschaften der Baustoffe zu sehen.

Mit dem Absorptionsvorgang und der Erwärmung des Bauteils setzt ein Wärmestrom durch das Bauteil ein, wenn zwischen den Seiten ein Temperaturgradient besteht. Dabei erfährt der Wärmestrom eine Veränderung durch die Temperaturamplitudendämpfung. Obwohl der Wärmestrom gerichtet erscheint, entstehen Querwärmeströme in das Bauteil und damit eine Reduzierung der durchgehenden Wärme.

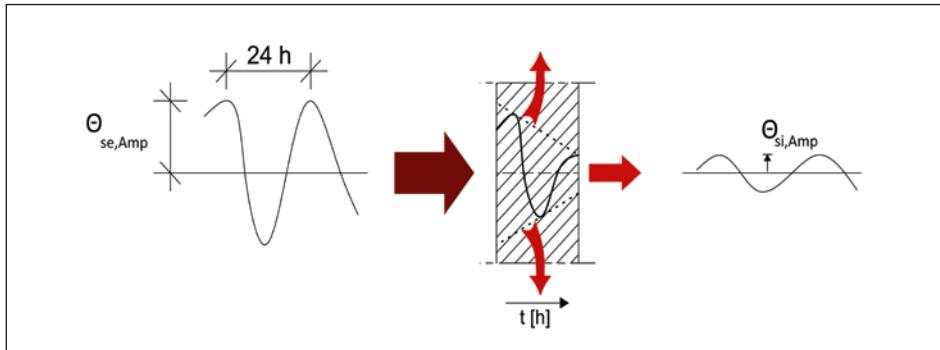
Der Einfluss auf die Nutzung solarer Gewinne bei opaken Bauteilen ist damit relativ gering und wurde lange Zeit überschätzt.<sup>24</sup> Von wesentlich größerer Bedeutung zur Bewertung der Behaglichkeit in Innenräumen sind dagegen transparente Oberflächen, die Strahlung durchlassen und durch den so genannten »Treibhauseffekt« wesentlich deutlicher an der Erwärmung eines Innenraums beteiligt sind.

Eine Bewertung von Konstruktionen kann durch das Temperaturamplitudenverhältnis TAV erfolgen. Hierbei gilt, dass ein niedriges Temperaturamplitudenverhältnis für geringere Schwankungen auf der raumseitigen Wandoberfläche steht. Dazu geben Schild und Willems in ihrer Veröffentlichung beispielhaft folgende Werte für Wandkonstruktionen im Vergleich an:

1. 24 cm verputztes Mauerwerk mit außenseitiger 10 cm EPS- Dämmung  
TAV 0,009/Zeitverschiebung  $\Delta t$  11,4 h
2. 36,5 cm Mauerwerk monolithisch, beidseitig verputzt  
TAV 0,047/Zeitverschiebung  $\Delta t$  14,2 h
3. Holzständerwerk mit Gipskartonbeplankung und Mineralwolle  
TAV 0,070/Zeitverschiebung  $\Delta t$  9,6 h

23 vgl. [17], S.117

24 vgl. [36], S.199



**Abb. 57:** Vereinfachte Darstellung der Temperaturamplitudendämpfung. Nach dem Auftreffen der Gesamtstrahlung erfolgt mit dem Wärmestrom eine Dämpfung, die aus den Verlusten im Inneren des Bauteils durch Querwärmeströme erfolgen und dem zeitlichen Verlauf.

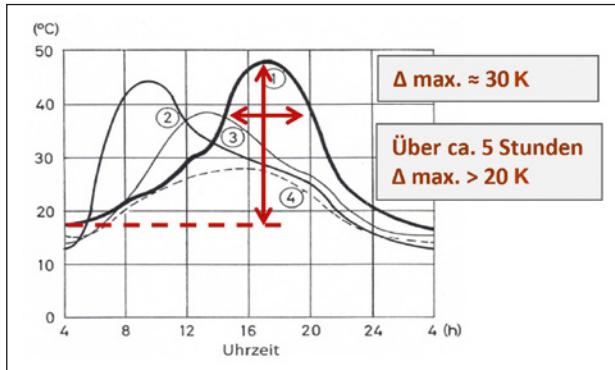
Anhand dieser Werte sieht man den dämpfenden Einfluss der außenseitigen Dämmung. Die außengedämmte Wand besitzt das geringste Temperaturamplitudenverhältnis und damit die geringsten Schwankungen der Oberflächentemperatur auf der Rauminnenseite.

Weiteren Einfluss auf den Grad der Erwärmung einer Oberfläche hat deren Ausrichtung und Neigung. Die höchste Erwärmung erfährt die westorientierte Außenwand im Tagesgang (Kurvenzug 1). Hier wird deutlich, wie die relativ tiefstehende Sonne und das über den Tag gestiegene Niveau der Außenlufttemperatur unterstützend wirken. Ebenso sind hohe Gewinne unter sommerlichen Bedingungen auf der Ostseite möglich (siehe Kurvenzug 2). Diese erfolgen natürlich wesentlich früher. Dämpfend auf die solaren Gewinne wirkt sich hier das noch niedrige Niveau der Außenlufttemperatur in den Morgenstunden aus. Deutlich abgeschwächt sind dagegen die Gewinne auf der südorientierten Wand (Kurvenzug 3). Hier wird die Auswirkung eines hohen Sonnenstandes spürbar, bei dem die direkte Bestrahlung eben nicht im optimalen Winkel auf die Bauteilfläche trifft.

Im Vergleich der Kurvenzüge, der von der Sonne beschienenen Wandflächen werden Erhöhungen der Oberflächentemperatur von:

- Westseite ca. 17.00 Uhr ca. + 30 K
- Ostseite ca. 10.00 Uhr ca. + 30 K
- Südseite ca. 13.30 Uhr ca. + 25 K

zur Ausgangstemperatur um ca. 4.00 Uhr erreicht:



**Abb. 58:** Erwärmungsverlauf einer verputzten Bims-Hohldienwand an einem strahlungsreichen Sommertag (Quelle: [4] Abb. 85, S. 123)

Obwohl in den Sommermonaten hohe Differenzen der Oberflächentemperaturen zur Umgebungsluft auftreten, sind die winterlichen Bedingungen für die Bewertung der Wärmegewinne von größerer Bedeutung, weil dann der Heizwärmebedarf am größten ist. Eine Publikation des Fraunhofer IPB<sup>25</sup> aus dem Jahr 1986 beschrieb die anzusetzende Berechnung zur Bewertung der Transmissionswärmeverluste von Wandkonstruktionen:

$$q = U \cdot \Delta \vartheta - \frac{U \cdot A \cdot J}{\alpha_a}$$

Dabei ist:

- U Wärmedurchgangskoeffizient in  $W/(m^2 \cdot K)$
- $\Delta \vartheta$  Temperaturdifferenz der Luft zu beiden Seiten der Wand in K
- A Absorptionskoeffizient
- J auftreffende durchschnittliche Strahlungsintensität in  $W/m^2$
- $\alpha_a$  äußerer Wärmeübergangskoeffizient in  $W/(m^2 \cdot K)$

Nach Werner hat die absorbierte Einstrahlung einen reduzierenden Einfluss auf die Transmissionswärmeverluste. An zwei unterschiedlichen Wänden, die mit einem U-Wert von 0,5  $W/(m^2 \cdot K)$  und 1,0  $W/(m^2 \cdot K)$  ohne Dämmung ausgeführt wurden, wurde offensichtlich, dass ab einer absorbierten Strahlung von  $300 W/m^2$  keine Transmissionswärmeverluste mehr vorliegen. Allerdings stellte Werner auch klar, dass derartige Werte in den Klimazonen Deutschlands eigentlich nicht erreicht werden. Hinzu kommt, dass zusätzlich die solaren Gewinne auf diesen Flächen deutlich vom Wind beeinflusst werden, was immer zu einer Reduzierung der Ergebnisse führt.

25 vgl. [41] IPB Mitteilung 110-13

Orientierung	Reduzierung des Transmissionswärmeverlustes		
	Helligkeit der Außenoberfläche		
	Hell (weiß) $A = 0,2$	Gedeckt (grau) $A = 0,5$	Dunkel (schwarz) $A = 0,85$
Süd	6 %	15 %	25 %
Ost zw. West	4 %	10 %	17 %
Nord	2 %	6 %	10 %

**Tab. 10:** Reduzierung des Transmissionswärmeverlustes nach Werner für unverschattete Flächen während der Heizperiode von Oktober bis Mai. Bei einem höheren Strahlungsangebot verändern sich die farbbezogenen Transmissionswärmeverluste.

### 5.2.3 Wärmegewinne bei transparenten Bauteilen

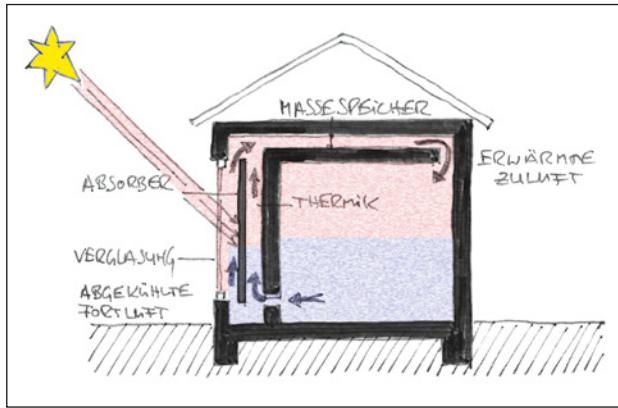
Die besondere Eigenschaft von Glas, nur ein begrenztes Spektrum an Wellenlängen durchzulassen, kann gezielt bei der Wärmegewinnung eingesetzt werden. Entscheidenden Einfluss hat dabei die Eigenschaft der Fläche, auf die die Strahlung auftritt.

Untersuchungen, wie Strahlungsenergie in Wärme in einem massiven Baukörper für ein Gebäude genutzt werden kann, erfolgten u. a. sowohl von Félix Trombe und Jacques Michel, wie auch Barra-Costantini. Beide Systeme nutzten massive schwere Wände als Solarabsorber, die hinter einer Verglasung, die über einen hohen Energiedurchlass verfügt, positioniert werden. In diesem besonderen Fall bietet ein hoher g-Wert des Glases einen Vorteil, da der Energiedurchlass durch das Glas nur geringfügig reduziert wird.

Das System von Barra-Costantini ordnet in einem durchlüfteten Raum zwischen einer Verglasung und einer massiven Wand einen Absorber an. Die sich im Zwischenraum erwärmende Luft steigt über die natürliche Thermik nach oben und wird über ein Kanalsystem zu einem Auslasspunkt im oberen Bereich eines Raums geleitet. Dabei erwärmt die Luft die massive Decke, die zugleich als Speicher wirkt. Vom oberen Einlasspunkt des Raums ausgehend erfolgt das Abkühlen der Luft. Die sich abkühlende und dichter werdende Luft fällt nach unten und gelangt zurück zu einer Einströmöffnung am unteren Punkt der Absorberwand. Zeitgleich strömt von oben warme Luft nach. Damit entsteht ein Luftwechsel im System, der nicht zwingend mechanisch unterstützt werden muss.

Zur Überprüfung der Wirksamkeit dieses Konzepts fanden an der Universität von Blida in Algerien Untersuchungen statt. Über sechs Tage fanden in einem Januar Messungen an einem Wohnraum in einem kleinen Wohngebäude mit Garage mit 16,6 m<sup>2</sup> Grundfläche und einer Raumhöhe von 3,06 m statt.<sup>26</sup> Die Raumkonstruktion bestand aus Wänden aus Ziegelmauerwerk und einem Boden aus 20 cm Beton. Der Absorber im Zwischenraum wurde mit einem Abstand von 10 cm zur Glasscheibe und massiver Wand eingebaut. Die vergleichende Untersuchung zwischen einem Raum mit und ohne Barra-Costantini-

<sup>26</sup> vgl. [21], S. 357–367

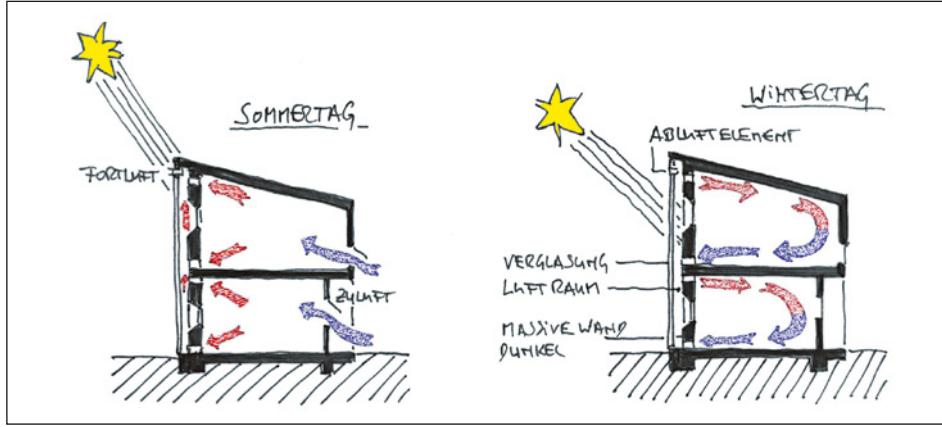


**Abb. 59:** Systemschnitt der Solarabsorberkonstruktion nach Barra-Costantini

System von Imessad et.al. zeigte, dass die Temperaturen im ausgestatteten Raum in den Abendstunden um 1,5 K und in den Tagstunden 3 K höher lagen gegenüber dem nicht ausgestatteten Raum. In den Tagesspitzen stieg die Temperatur nie höher als 22 °C bei einer Außentemperatur, die am Tag zwischen 12 °C und ca. 16 °C lag. Die Autoren der Universität von Breda kamen mit ihrer 2004 veröffentlichten Untersuchung zu dem Ergebnis, dass das Barra-Costantini-System einen Beitrag zur Energieeinsparung leisten kann. Grundsätzlich sollte es jedoch in ein konventionelles Heizsystem eingebunden werden. Alleine reichen die energetischen Gewinne des Systems nicht aus.

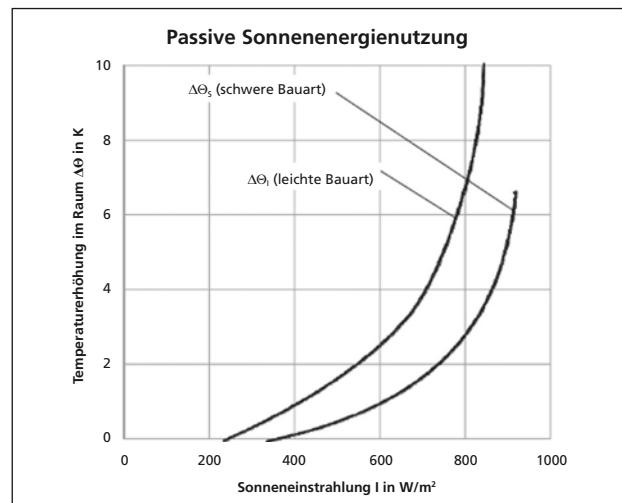
Ein sehr ähnliches System stellt die Trombe-Wand dar. Mit diesem einfachen Aufbau, bei dem speicherfähige Masse hinter einer Verglasung liegt, wird ebenso der kurzwellige Anteil der Sonnenstrahlen absorbiert und mit dem Auftreffen in langwellige Wärmestrahlung gewandelt.

Zur Steigerung der Effektivität sind Material- und Oberflächeneigenschaften bedeutsam. Vorteile haben dunkle und matte Oberflächen, die über einen geringen Reflexionsgrad verfügen und Stoffe mit einer hohen Wärmekapazität wie zum Beispiel Beton.



**Abb. 60:** Schema der Strömungsbedingungen in einem Gebäude mit einer Trombe-Wand unter sommerlichen und winterlichen Bedingungen

**Abb. 61:** Passive Sonnenenergienutzung bei Sonneneinstrahlung und die daraus resultierende Temperaturerhöhung in gleichen Räumen unterschiedlicher Bauart (Quelle: [9], S. 178 und [18])



Um die angrenzenden Räume jedoch vor Überhitzung zu schützen, sollten diese wärme-gewinnenden Systeme hauptsächlich auf die winterlichen niedrigen Sonnenstände hin konzipiert werden.

Die Nutzung einer Trombe-Wand oder des Barra-Costantini-Systems würde unter sommerlichen Bedingungen zu einer zu hohen energetischen Aufladung der wärmespeichernden Konstruktionen und angrenzenden Räume führen. Aus diesem Grund müssen die vorgelagerten Glasfassaden mit Lüftungsöffnungen ausgestattet werden, um hohe Wärmelasten mittels Thermik abzuführen.

Den Einfluss der gewählten Konstruktion auf die passive Nutzung der Sonnenenergie verdeutlicht das folgende Diagramm. In einem Raum mit leichter Bauart beginnt die Erwärmung früher und mit einer stärkeren Temperaturerhöhung gegenüber einem gleichen Raum aus der schweren Bauart.

## 5.3 Konstruktionen und Materialeinsatz

In der Planung stellt sich bereits früh die Frage, ob durch die Auswahl von Materialien Einfluss auf die Behaglichkeit oder Energieeffizienz genommen werden kann. Bereits mit der Materialauswahl und den daraus resultierenden bauphysikalischen Eigenschaften kann im Planungsprozess auf die möglichen Potenziale zur Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz Einfluss genommen werden.

### 5.3.1 Betonkernaktivierung

Für eine Gesamtkonzeption der energetischen Versorgung mit Wärme und Kälte kann durch den Einbau eines Rohrnetzes in die Rohbetondecke eine Betonkernaktivierung erfolgen, um den Heiz- und Kühlenergieeinsatz zu senken. Dabei bildet diese Form der Beeinflussung des Raumklimas eine kostengünstige Alternative zu den herkömmlichen



**Abb. 62:** Verlegtes Rohrnetz einer Betonkernaktivierung auf der unteren Bewehrungslage einer Deckenplatte (im Durchstanzbereich der Innenstützen sind die Rohrnetze aus konstruktiven Gründen nicht verlegt) (Quelle: Museum für Naturkunde Berlin)

Kühl- und Heizsystemen. Das Grundprinzip beruht dabei auf der Fähigkeit von massiven Decken- und Wandelementen, thermische Energie zu speichern und so Einfluss auf das Raumklima zu nehmen.

Der Aufbau und die Funktion einer Betonkernaktivierung oder Betonkerntemperierung entsprechen im Wesentlichen dem einer klassischen Fußbodenheizung. Jedoch wird in der klassischen Ausführung die thermisch aktivierte Bauteilschicht über der Rohbetondeckenplatte, im Estrich bei einem wasserführenden Heizsystem oder auf dem Estrich und unterhalb des Oberbodenbelags bei einem elektrischen Heizsystem, verlegt. Für die Betonkernaktivierung wird die Rohdecke direkt als thermisches Medium genutzt, dabei wird ein enges Rohrnetz zwischen der oberen und unteren Bewehrungslage verlegt, durch welches kaltes oder warmes Wasser im jahreszeitlichen Wechsel durchgeleitet wird.

Durch diese Wahl der Anordnung der Wasserrohre ergibt sich, dass die Ober- und Unterseite erwärmt bzw. gekühlt werden können, wodurch die Betondeckenplatten zu einem sogenannten thermoaktiven Bauteil werden und eine Wärmeübertragung als Niedertemperatur-Flächenheizung oder Kühlung möglich ist.

Haben Raumluft und Deckenplatte unterschiedliche Temperaturen, entsteht aufgrund der Temperaturdifferenz ein Wärmeübergang vom wärmeren zum kälteren Stoff. Diese physikalische Grundbedingung kann sowohl für den Heiz- wie für den Kühlfall genutzt werden. Unter sommerlichen Bedingungen wird zur Kühlung kaltes Wasser durch die Rohre im Inneren der Deckenplatte gepumpt. Dadurch liegt die Temperatur der Deckenplatte unter der Raumlufttemperatur und die Wärme der Raumluft geht in die Deckenplatte über und wird über den Wasserkreislauf abtransportiert. Durch die Abkühlung der Raumluft im Bereich der anliegenden Grenzschicht erhöht sich die Dichte der Luft, die dann als schwerere Kaltluft abfällt. Damit funktioniert das System der Betonkernaktivierung ähnlich dem einer abgehängten Kühldecke. Um die Funktions- und Leistungsfähigkeit einer Betonkernaktivierung (BKA) herauszustellen ist durch Moises<sup>27</sup> ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit durchgeführt worden. Dafür sind die fünf Systeme in Tabelle 11 miteinander verglichen worden. Hierfür wurde als Ausgangssituation ein Basissystem gewählt, welches ein Bürogebäude mit Heizkörpern beheizt und bei dem keine mecha-

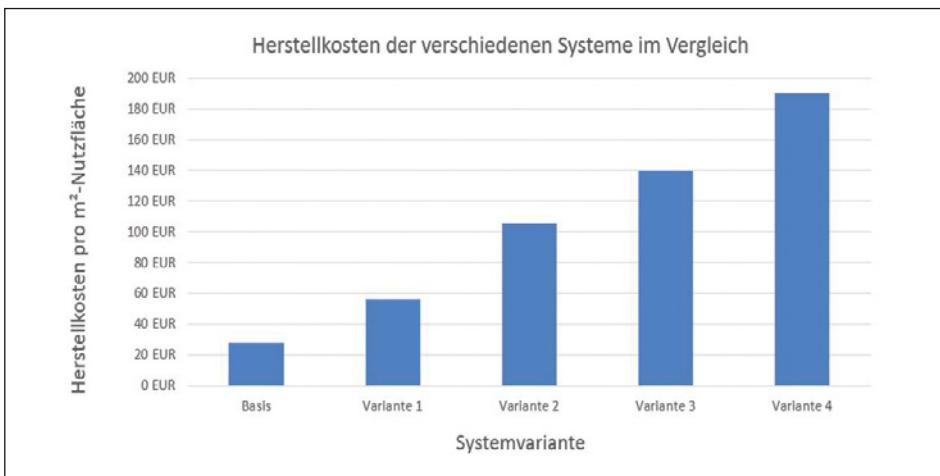
27 Wolfgang Moises, Team für Technik GmbH

nische Belüftung vorliegt, sondern eine Fensterlüftung erfolgt. Das Ausgangssystem stellt daher einen Standardfall für deutsche Bestandsbürogebäude dar. Vergleichend sind vier Varianten mit unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten der Betonkernaktivierung und einer angekoppelten Be- und Entlüftungsanlage aufgestellt worden. Die Heiz- und Kühltemperatur sowie die Systemzusammensetzungen sind dabei praxisgerecht festgelegt.

Für die vergleichende Berechnung sind die Kriterien Herstellungskosten, Energieverbrauch im Betrieb sowie Energie und Wartungskosten berücksichtigt worden. Die Erfahrungswerte bilden die Grundlage für die vergleichende Gegenüberstellung und wirtschaftliche Auswertung. Um eine projektübergreifende Vergleichbarkeit herzustellen,

Basisvariante		
Heizung	Heizkörper	Auslegungsfall 45/35 °C
Kühlung	keine	
Lüftung	Fensterlüftung	
Variante 1		
Heizung	Betonkernaktivierung (50 %) Restheizlast über Heizkörper (50 %)	Heiztemperaturen 26/22 °C Heiztemperaturen 45/35 °C
Kühlung	Betonkernaktivierung (100 %)	Kühltemperaturen 17/20 °C
Lüftung	Fensterlüftung	
Variante 2		
Heizung	Betonkernaktivierung (50 %) Restheizlast über Heizkörper (50 %)	Heiztemperaturen 26/22 °C Heiztemperaturen 45/35 °C
Kühlung	Betonkernaktivierung (100 %)	Kühltemperaturen 17/20 °C
Lüftung	Lüftungsanlage mit Luftwechsel 1,5 1/h Wärmerückgewinnung mit 80 % Rückwärmzahl	
Variante 3		
Heizung	Heiz-Kühldecke (100 %)	Heiztemperaturen 26/22 °C
Kühlung	Heiz-Kühldecke (100 %)	Kühltemperaturen 17/20 °C
Lüftung	Fensterlüftung	
Variante 4		
Heizung	Heiz-Kühldecke (100 %)	Heiztemperaturen 26/22 °C
Kühlung	Heiz-Kühldecke (100 %)	Kühltemperaturen 17/20 °C
Lüftung	Lüftungsanlage mit Luftwechsel 1,5 1/h Wärmerückgewinnung mit 80 % Rückwärmzahl	

**Tab. 11:** Vergleichende Systeme der Beheizung und Belüftung eines Standardbürogebäudes



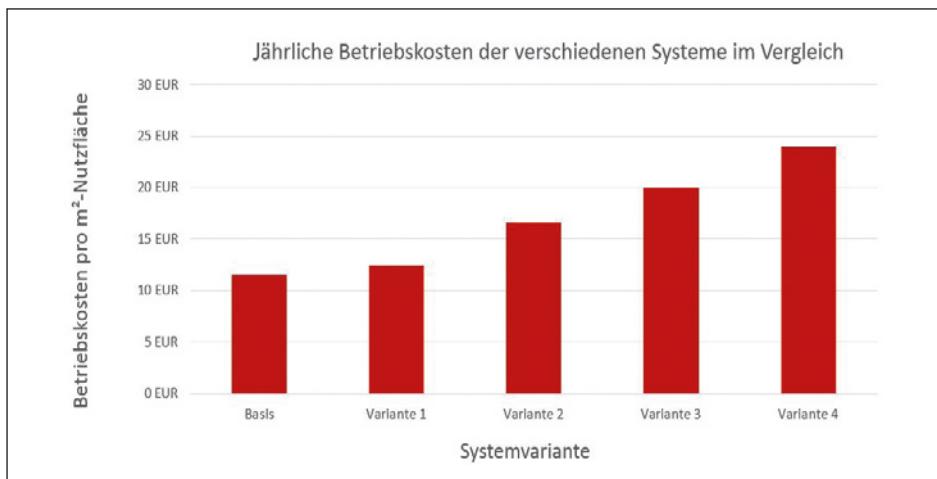
**Abb. 63:** Grafische Gegenüberstellung der Herstellungskosten (inkl. 19 % MwSt.) bezogen auf 1 m<sup>2</sup>-Nutzfläche für einen mögliche Ausführungsvariante einer Bürogebäude-Klimatisierung (Systemvarianten nach Tabelle 11)

welche auf Standard-Bürogebäude als Richtwert angesetzt werden kann, ist in Abbildung 63 ein Kostenvergleich bezogen auf den Quadratmeter Nutzfläche aufgeführt. Dieser Kostenvergleich beinhaltet die folgenden Kosten, die kapitalbezogen in die Vergleichsrechnung einfließen:

- Herstellkosten, daraus jährliche Kapitalkosten der Mehrinvestition
- jährliche Kapitalkosten
- jährliche Energiekosten
- jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten
- jährliche Betriebskosten als Summe der Energie-, Wartungs- und Instandhaltungskosten

Jeder Kostenpunkt muss unter Berücksichtigung der jeweiligen Nutzungsdauer und einer durchschnittlichen Kapitalverzinsung (hier im Beispiel mit 4,0 % p. a. angesetzt) auf den Einbauzeitpunkt der Anlage bezogen werden, um die jährlichen Gesamtkosten in Euro pro Jahr zu erhalten.

Aus der kostenbezogenen Auswertung wird deutlich, dass bei den Herstellungskosten (siehe Abbildung 63) ein aufwendiges System mit Pumpen, Betonkernaktivierung und ggf. einer mechanischen Lüftungsanlage deutlich teurer ist als die konventionelle Variante mit Heizkörpern in Kombination mit einer Lüftung durch Fensteröffnung. Jedoch zeigen sich bei den jährlichen Betriebskosten (siehe Abbildung 64) fast gleiche Ergebnisse bei der Basisausführung und der Variante 1. Bei einem qualifizierten Vergleich und einer optimalen Auslegung lassen sich so bereits deutliche Vorteile auf Seiten der aktivierte Bauteile verzeichnen.

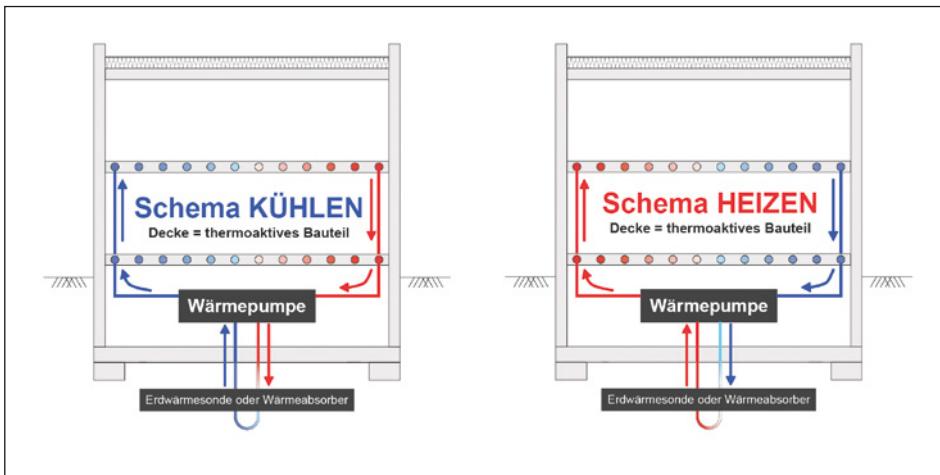


**Abb. 64:** Grafische Gegenüberstellung der jährlichen Betriebskosten (inkl. 19 % MwSt.) bezogen auf 1 m<sup>2</sup>-Nutzfläche für eine mögliche Ausführungsvariante einer Bürogebäude-Klimatisierung (Systemvarianten nach Tabelle 11)

Eine Übersicht über die Gesamtbewertung der Einzelkriterien für eine Planung lassen sich nach Moises in der nachstehenden Tabelle kategorisieren und können als Planungsgrundlage herangezogen werden.

	<b>Basisvariante</b>	<b>Variante 1</b>	<b>Variante 2</b>	<b>Variante 3</b>	<b>Variante 4</b>
	Heizkörper	Betonkern-aktivierung	Betonkern-akt./RLT	Heiz-Kühl-Decke	Heiz-Kühl-Decke/RLT
Herstellkosten	niedrig	mittel	hoch	hoch	sehr hoch
Qualitätspunkte	+	0	-	-	--
Energiekosten	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
Qualitätspunkte	0	0	0	0	0
Gesamtkosten	niedrig	niedrig	mittel	mittel	mittel
Qualitätspunkte	+	+	0	0	0
Wartung	niedrig	niedrig	hoch	niedrig	sehr hoch
Qualitätspunkte	+	+	-	+	--
Winterliche Nutzung	gut	sehr gut	sehr gut	gut	sehr gut
Qualitätspunkte	+	++	++	+	++
Sommerliche Nutzung	sehr schlecht	gut	gut	sehr gut	sehr gut
Qualitätspunkte	---	+	+	++	++
<b>Summe der Qualitätspunkte</b>	<b>+ 1</b>	<b>+ 5</b>	<b>+ 1</b>	<b>+ 3</b>	<b>+ 0</b>

**Tab. 12:** Gesamtvergleich mit einer Übersicht über die wesentlichen Faktoren der Systemvarianten.



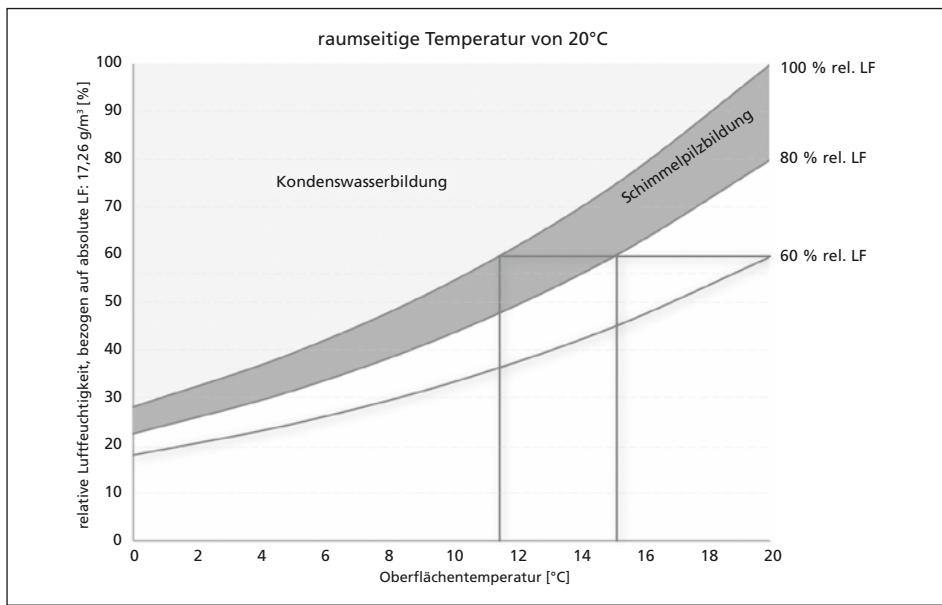
**Abb. 65:** Schematische Wirkungsweise der Betonkernaktivierung für den Heiz- und Kühl-Fall. In beiden Fällen wird die Gebäudemasse zur Regulierung genutzt.

Im Gegensatz zur Betonkernaktivierung kann über eine herkömmliche Klimaanlage eine wesentlich stärkere und leichter regulierbarere Gebäudekühlung erreicht werden, da die Betonplatte aufgrund ihrer höheren Masse und Abmessung mit einer größeren thermischen Trägheit langsamer auf Temperaturveränderungen reagiert.

Daher können über eine Klimaanlage grundsätzlich höhere Wärmelasten abgeführt werden, da ein permanenter und größerer Austausch der Innenraumluft gewährleistet ist. Jedoch sind die Nachteile, dass durch den erhöhten Technikgrad mit einer Klimaanlage die Wartungsintensität, der Stromverbrauch und auch der Platzbedarf für die technische Anlage deutlich ansteigen. Außerdem ist die Kühlung über die Betonkernaktivierung eine »leise« Methode, da weder eine Geräuschbelastung entsteht, noch eine Aufwirbelung der Raumluft stattfindet, welche insbesondere Allergikern zugutekommt.

Durch den Einbau einer Betonkernaktivierung kann in Aufenthalts- sowie Bürobereichen, in denen konstant gleiche Mengen an Wärmelasten anfallen, in der Regel auf Klimaanlagen verzichtet werden. Wenn jedoch sehr hohe Wärmelasten anfallen, wie es beispielsweise in Server-Räumen der Fall ist und eine Kühlung zwingend erforderlich ist, kann häufig auf den zusätzlichen Einbau einer mechanischen Klimaanlage nicht verzichtet werden. Anzumerken ist, dass diese Räume in einem Bürogebäude nur wenige Prozent der Gesamtfläche ausmachen. Jedoch kann auch mit der Kombination Klimaanlage und Betonkernaktivierung ein deutliches Einsparpotenzial im Verbrauch der Kühlenergie erreicht werden. In diesen Fällen kann über die Betonkernaktivierung die Grundlast der entstehenden Wärme im Raum abtransportiert werden. Die restliche Wärmemenge muss dann nur noch über die Klimaanlage fortgelüftet werden.

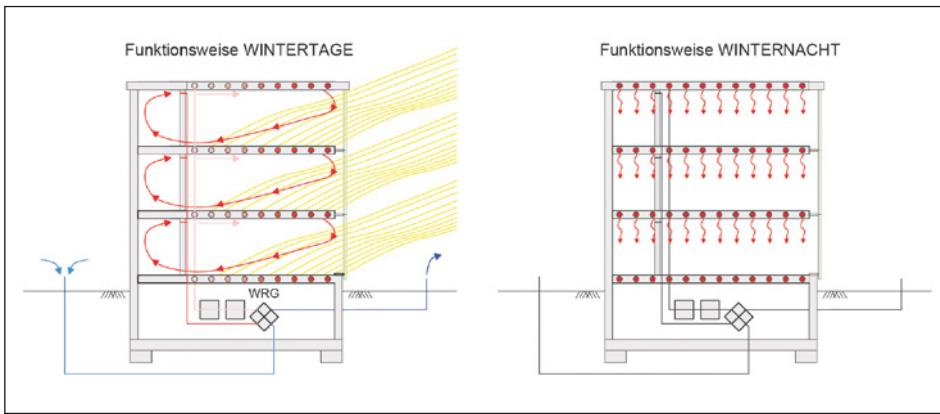
Wie bereits erwähnt, gibt es allerdings auch Grenzen für den Einsatz der Betonkernaktivierung, diese werden durch die maximale Verlegedichte der Rohre und durch die maximal mögliche Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Bauteiltemperatur auferlegt. Als ein geeignetes Abstandsmaß zwischen den Rohren haben sich 10 bis 15 cm herausgestellt. Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung der benachbarten Rohre würde ein



**Abb. 66:** Auswirkungen einer verminderten Bauteiloberflächentemperatur auf den Feuchtegehalt bei einer raumseitigen Lufttemperatur von 20 °C.

engerer Abstand nur zu einer Überlagerung der Wirkungskreise führen, wodurch jedoch keine weiteren nennenswerte Leistungsfähigkeitssteigerung erreicht wird. Den größten Einfluss auf die potenzielle Leistungsübertragung hat die Temperatur des Wassers in den Rohren. Die grundlegenden Grenzen schaffen dabei die bauphysikalischen Randbedingungen der thermisch aktivierten Bauteile und die über die Anlagentechnik praktisch umsetzbare Minimal- und Maximalwassertemperatur. Für die Gebäudekühlung darf das Bauteil nicht so weit heruntergekühlt werden, dass ein Tauwasserausfall auf der kühlen Bauteiloberfläche stattfindet. Eine erste Abschätzung zur Festlegung der minimalen Bauteiloberflächentemperatur in Abhängigkeit der standardmäßigen Raumlufttemperatur von 20 °C kann über Abbildung 66 erfolgen.

Exemplarisch ist das Ablesebeispiel für eine raumseitige Luftfeuchtigkeit von 60 % eingetragen. Man erkennt, dass ab einer Bauteiloberflächentemperatur von unter 15 °C die Gefahr der Schimmelpilzbildung beginnt und unter 11 °C der Ausfall von Kondenswasser stattfindet. Hinzu kommt, dass Beton eine kapillare Wirkung hat und dadurch das freigewordene Kondenswasser aufgenommen wird. Mit dem Beginn der kapillaren Saugwirkung des Betons kann eine dauerhafte Schädigung des Bauteils anfangen, welche langfristig auch bei Innenbauteilen zu einer Bewehrungskorrosion führt. Die in dem Diagramm ablesbare Ausgangstemperatur kann so als Anhaltswert für die Auslegungstemperatur des Wassers in den Rohren herangezogen werden. Dieses Beispiel zeigt, dass die Leistungsfähigkeit einer Betonkernaktivierung begrenzt ist. Ebenso besteht im Heizfall mit einer zu hoch eingestellten Wassertemperatur eine Überheizungsgefahr für das System. Typische Auslegungswerte sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.



**Abb. 67:** Winteranwendung: Nutzung der thermischen Bauteilaktivierung von Deckenplatten bei solarer Einstrahlung tagsüber (links) und in der Nachtnutzung (rechts)

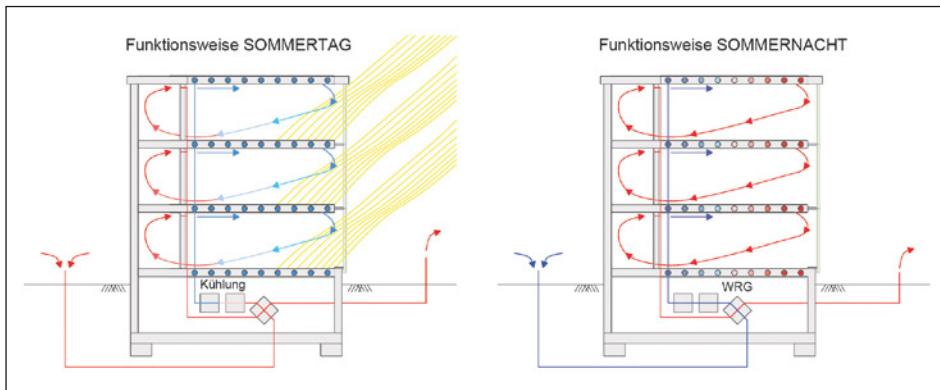
	Kühlen	Heizen
Wassereintrittstemperatur	18°C	26°C
Wasseraustrittstemperatur	22°C	23°C
Raumtemperatur	26°C	20°C
Leistung der Decke	40 W/m <sup>2</sup>	20 W/m <sup>2</sup>

**Tab. 13:** Typische Auslegungswerte für den Betrieb einer Betonkernaktivierung (Quelle: Wolfgang Moises, Team für Technik GmbH)

Da keine absolute Raumklimatisierung erfolgen kann, ist für die Effektivität der thermischen Bauteilaktivierung die ganzheitliche Nutzung und der andauernde Beitrag zur Innenraumtemperierung entscheidend. Wie in Abbildung 67 dargestellt ist die effektivste Nutzung eine Kombination aus Tag- und Nachtsteuerung unter Berücksichtigung der Sonneneinstrahlung an kalten und heißen Tagen.

Im Winter erfolgt tagsüber die Rückgewinnung der Wärmeenergie aus der Abluft und eine Speicherung innerer Wärmequellen sowie solarer Gewinne in der massiven Gebäudemkonstruktion. Zusätzlich wird eine Erwärmung der Zuluft durch die in den Geschossdecken gespeicherte Wärmeenergie vollzogen. Nachts wird die zeitverzögerte Nutzung der tagsüber in den massiven Geschossdecken gespeicherten Wärmeenergie für Raumtemperierung genutzt. Durch diese ganzheitliche Nutzung der Bauteilaktivierung können die Anlagen permanent genutzt werden.

An warmen Sommertagen kann eine zusätzliche Senkung der Temperatur erfolgen indem in die Deckenplatten Zuluft-Kanäle verlegt werden, die als Teil einer Lüftungsanlage in einem Lüftungssystem integriert sind (siehe Kapitel 6.3.4). Dabei dienen die Decken zur Aufnahme der Wärmeenergie innerer und äußerer Wärmequellen über die in der Nacht entladenen Betondecken. In Sommernächten findet eine Entladung der am Tag erwärmten Geschossdecken mit kühler Nachtluft statt. Dies kann wie die Abbildung 68 zeigt zusätzlich in Kombination für die Kühlung mit Wärmepumpen und Erdsonden herangezogen werden.



**Abb. 68:** Sommeranwendung: Nutzung der thermischen Bauteilaktivierung von Deckenplatten bei solarer Einstrahlung (links) und in der Nachtnutzung (rechts)

### 5.3.2 Klimatisierung über Pfahlgründungen

Die Pfahlgründung ist eine Methode der Tiefgründung. Der Lastabtrag findet über Mantelreibung und Spitzendruck des Pfahls statt. Da häufig sehr tiefe Pfähle gesetzt werden, um die Mantelreibung zu erhöhen und um in tragfähigere Bodenschichten einzudringen, empfiehlt es sich zu überprüfen, ob eine Nutzung der geothermischen Bedingungen um den Pfahl lohnenswert ist. Da die Luft- und Jahreszeitentemperaturen in großen Tiefen keinen Einfluss mehr auf die Bodentemperatur haben, trifft der Pfahl in der Tiefe auf einen konstanten Wärmespeicher. Die Eigenschaft, dass die Bodentemperatur in der Tiefe wieder zunimmt, spielt für die geothermische Aktivierung von Pfahlgründungen keine Rolle und wird daher in dieser Ausarbeitung nicht weiter thematisiert.

Die Verbindung von Pfahlgründung und der geothermischen Untergrundnutzung wird meist als »Energiepfahlgründung« bezeichnet. Bei dieser Methode können Ortbetonpfähle, Fertigpfähle, Hohlpfähle oder Presspfähle nach der Einbindung in den Boden aktiviert werden.

In Abbildung 69 ist der Kern einer Energiepfahlgründung in einer Systemskizze dargestellt. Die dargestellten Rohrsysteme in dem Betonpfahl zeigen, wie der Wärmeenergietransport funktioniert.

Die Nutzung des oberflächennahen Untergrundes wird u. a. in den Richtlinien »VDI 4640-Thermische Nutzung des Untergrundes« definiert. In der Richtlinie werden Energiepfähle als Wärmequellen- und Wärmesenken-Anlagen beschrieben, die gleichermaßen für eine Kühlung sowie für eine Erwärmung sorgen können.

Immer zu bedenken ist, dass eine Pfahlgründung in erster Linie die Aufgabe hat, Lasten in den Baugrund abzutragen, daher muss ein besonderes Augenmerk darauf gelegt werden, dass die Nebenfunktion als geothermischer Wärmeüberträger diese Primärfunktion nicht gefährdet. Somit muss eine Verminderung der Tragfähigkeit der Pfähle, zum Beispiel durch Frostbildung, Querschnittsverringerung oder Verbundmängel zwingend in der statischen Berechnung berücksichtigt werden.

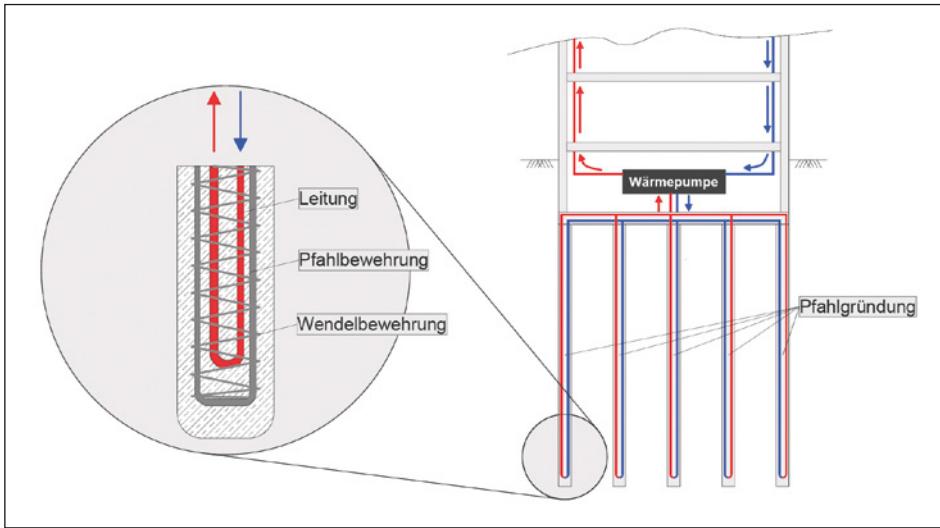


Abb. 69: Aufbau und Wirkungsweise eines Energiepfahls

Interessant ist der Einsatz einer Energiepfahlanlage als Wechselspeicheranlage, die einen saisonal wechselnden Heiz- und Kühlbetrieb unterstützt und den umliegenden Boden als Pufferspeicher nutzt. Dadurch wird eine optimale spezifische Entzugsleistung sowohl für die Wärme- als auch für die Kältegewinnung erreicht. Dabei ist darauf zu achten, dass der Temperaturaustausch über die Energiepfahlanlage nachhaltig stabil gestaltet wird. Der schematisch optimale Verlauf des saisonalen Speicherzyklus ist in Abbildung 70 dargestellt.

Um einen optimalen Temperaturaustausch zu gewährleisten, kommt dem Deckenanschluss der Energiepfähle ebenfalls eine entscheidende Bedeutung zu. Die Leitungen innerhalb der Decken müssen nah an die Deckenunterkante gelegt werden, damit die Temperaturausbreitung nicht innerhalb der Decke zuviel Energie abgibt, ohne an den

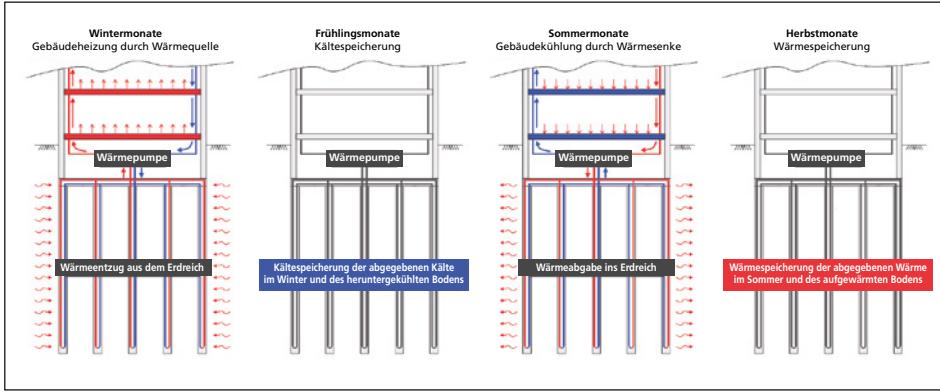


Abb. 70: Saisonaler Verlauf der Temperaturinteraktion zwischen Pfählen und Boden

Raum abgegeben zu werden. Deshalb ist bei diesen Systemen auch darauf zu achten, Baustoffe mit möglichst gleichen Wärmeübergangskoeffizienten zu verwenden, da so Sprünge und eventuelle Schwachstellen vermieden werden können.

## 5.4 Beton und Stahlbeton – energieeffiziente Variationen

Beton kann wesentlich mehr Stoffe und Zusätze enthalten als die Grundstoffe Zement, Gestein und Wasser. Damit kann ein auf die unterschiedlichen Anforderungen abgestimmter spezieller Beton mit besonderen spezifischen Eigenschaften hergestellt werden. Tabelle 14 gibt einen Überblick über die möglichen Bestandteile im Beton, eingeteilt in die Oberkategorien Betongrundstoffe, Betonzusatzstoffe und Betonzusatzmittel. Für die genaue Mischungszusammensetzung sollten entsprechende Planer mit betontechnologischen Kenntnissen zu Rate gezogen werden.

Wesentlicher Vorteil des Stahlbetons ist die hohe Tragfähigkeit und die fast freie Möglichkeit der Formgebung von Bauteilen aus Beton. Jedoch weist der im Bauwesen eingesetzte Normalbeton keine besonderen Vorteile bezüglich der Wärmedämmegenschaften auf, da Normalbeton auf Grund der hohen Rohdichte in der Regel eine Wärmeleitfähigkeit von ungefähr  $\lambda = 2,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  besitzt und damit ein relativ gut wärmeleitendes Material ist. Daher müssen für die heutigen Anforderungen an den Wärmeschutz und die damit verbundene energetische Qualität der Gebäudeaußenhülle zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden. Der übliche Regelfall ist der additive Einsatz eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) bestehend aus einem Dämmstoff und einem witterungsbeständigen Außenputz.

Natürlich bietet die hohe Dichte des Betons auch einige Vorteile in der energetischen Gesamtbetrachtung wie die thermische Speicherfähigkeit von solaren und internen Wärmegegewinnen in den Wintermonaten oder auch die hohe thermische Kapazität, die es ermöglicht auch bei relativ starker Sonneneinstrahlung in der heißen Jahreszeit die Rauminnentemperaturen noch im behaglichen Bereich zu halten. Für den sommerlichen Wärmeschutz ist diese Eigenschaft also von Nutzen (siehe Kapitel 6), um ohne maschinelle Unterstützung eine erträgliche Raumtemperatur vorzuhalten.

Welche Variationen für den Werkstoff Beton gemacht werden können, um eine möglichst hohe Ausnutzung aller Vorteile zu erreichen und zugleich die energetische Qualität zu steigern, soll im Folgenden näher vorgestellt werden.

### 5.4.1 Einsatz von Leichtbeton

*Opus caementitium*, auch als römischer Beton bezeichnet, ist einer der ersten Beiträge zum rationalen Bauen gewesen. *Opus caementitium* ist nicht nur der Beton als solcher, sondern bezieht sich auf das ganze Herstellungsverfahren. Das, was in der heutigen Zeit einer Ortbetonbaustelle entspricht, wurde bereits von den Römern etwa 100 v. Chr. in ähnlicher Form praktiziert. In dem Bauprozess sind Schalen aus aufgemauerten Steinen, Holzbrettern und Balken errichtet worden und mit dem hydraulisch erhärtenden Gemisch, welches in der Baugeschichte die Bezeichnungen Gussmauerwerk, Gussbeton oder auch

Kalkbeton erhalten hat, verfüllt worden. Nachdem der Erhärtungsprozess abgeschlossen war, sind die Schalen entfernt worden und das Bauteil aus früherem Beton war fertig.<sup>28</sup>

Die Zusammensetzung des Gesamtprodukts bestand im Wesentlichen aus Steinen, Sand und gebranntem Kalkstein. Diesem Gemisch wurden Puzzolane als Zuschläge beigemischt, um hydraulische Eigenschaften zu erhalten. Die eingesetzten Puzzolane sind natürliche oder auch künstliche Gesteine, wie beispielsweise Gestein aus vulkanischem Ursprung oder Sedimentgesteine (Trass, Tone oder Schiefer), die reaktives Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) enthalten. Puzzolane reagieren bei Wasserzugabe mit Calciumhydroxid ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) und können durch den chemischen Prozess ein druckfestes Gestein erzeugen.<sup>29</sup>

Diese Eigenschaft nutzen die Römer, um aus den Einzelstoffen bei Zugabe von Wasser in Verbindung mit einer Temperaturentwicklung ein verarbeitbares Gemisch zu erhalten. Die wesentlichen Unterschiede zwischen unserem heutigen Beton und dem römischen Beton (*opus caementitium*) sind in Tabelle 14 gegenübergestellt.

Endprodukt	Bindemittelausgangsstoffe	Eigenschaften
Heutiger Beton	Zement: Mischung aus Kalkstein und Ton wird vermahlen, bei ca. 1400°C gebrannt und ggf. mit Hüttensand o.ä. vermischt.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Druckfestigkeit</li> <li>• kann unter Wasser erhärten</li> <li>• wasserbeständig</li> </ul>
Römischer Beton	Römischer Baukalk: Kalkstein wird (ohne oder mit Ton) bei ca. 1000°C gebrannt und mit Puzzolanen vermischt.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niedrige Druckfestigkeit</li> <li>• nur Bindemittel aus bestimmten Ausgangsstoffen erhärten unter Wasser</li> <li>• nur sehr bedingt wasserbeständig</li> </ul>

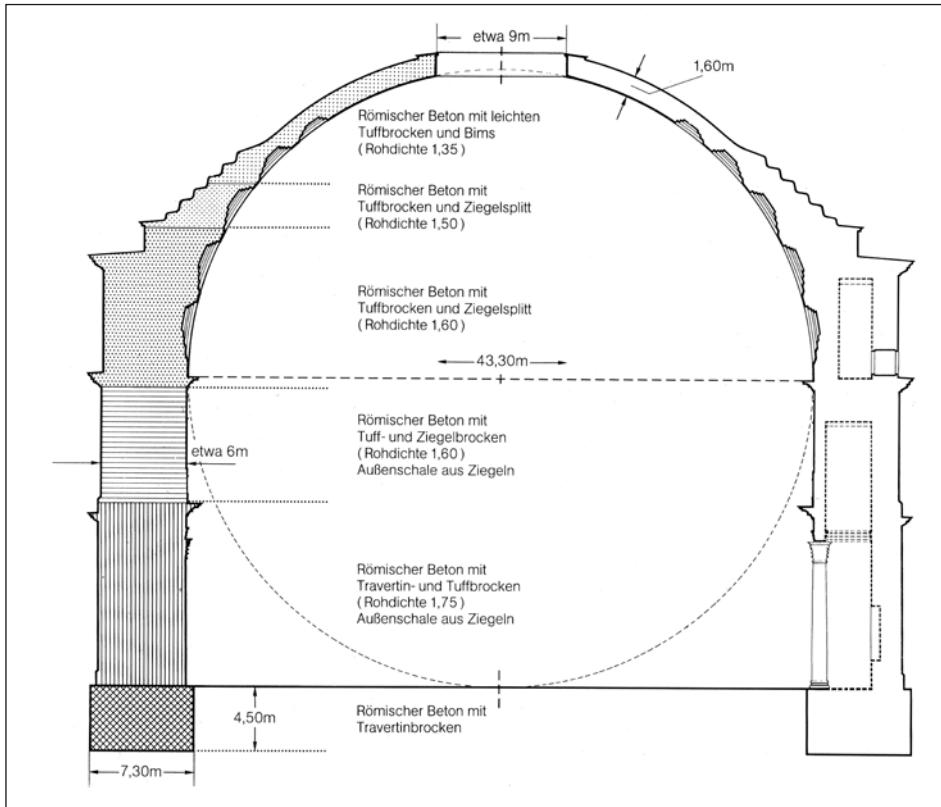
**Tab. 14:** Gegenüberstellung von heutigem Beton und römischem Beton (Quelle: [26], S. 32)

Ein perfektes Beispiel für die frühe Umsetzung einer angepassten Bauweise an die statisch konstruktiven Erfordernisse ist das 120 n. Chr. errichtete Pantheon in Rom. Hierbei wurden Leichtbetone verwendet, welche immer leichtere Zuschläge bis zur Kuppelspitze hatten. Dadurch wurde das Gesamtgewicht des Bauwerks und die Belastung des Untergrunds erheblich herabgesetzt (siehe Abbildung 71). Die Rohdichte der einzelnen Schichten wurde über die Zuschläge beeinflusst. Für den Bau der Pantheon-Kuppel sind dabei Tuffstein, Bims und Ziegelsplitt als Zuschlag zum Einsatz gekommen. Je nach Mengenanteilen der Zuschlagstoffe konnte so die Rohdichte des Endprodukts erheblich beeinflusst werden. Tuff ist ein Vulkangestein, das durch den eruptiven Entstehungsprozess Gaseinschlüsse hat und wegen des hohen Porenanteils eine geringe Dichte aufweist. Bims ist ebenfalls ein Vulkangestein, welches jedoch durch den großen Porenanteil nochmal deutlich leichter ist und eine sehr geringe Dichte aufweist.

Das Prinzip des Leichtbetons, angepasst an die baulichen Erfordernisse, erlebt in der heutigen Zeit eine Renaissance, da leichte Baustoffe mit einer geringen Rohdichte nicht

28 vgl. [26], S. 33

29 vgl. HeidelbergCement: Betontechnische Daten (Ausgabe 2014, S. 4)



**Abb. 71:** Einsatz von römischem Leichtbeton gestaffelt über die Höhe mit abnehmender Rohdichte im neuerrichteten Pantheon in Rom (Quelle: [26], S. 208)

nur das Gesamtgewicht der Konstruktion herabsetzen, sondern auch positiven Einfluss auf die dämmenden Eigenschaften der Gebäudeaußenhülle haben. Eine werkstoffseitige Beeinflussung kann also zu monolithischen Bauteilen führen, die Tragfähigkeit und Wärmedämmung vereinen.

Der heute eingesetzte Leichtbeton funktioniert nach dem gleichen Prinzip wie vor über 2000 Jahren der *opus caementitium*. Lediglich die Zuschlagstoffe werden variiert, um aus einem Normalbeton einen Beton mit leichterer Rohdichte zu machen. Jedoch stehen auch die Festigkeitsanforderungen im Fokus des Bauens, sodass nicht jeder beliebige Leichtzuschlag die gleichen qualitativen Auswirkungen auf das Endprodukt besitzt.

In der Regel spricht man ab einer Betondichte von weniger als  $2,0 \text{ kg/dm}^3$  von einem leichten Beton. Weitere Abgrenzungen über die Rohdichte werden wie folgt definiert:

- Infraleichtbeton:  $0,3$  bis  $0,8 \text{ kg/dm}^3$
- Normalbeton:  $2,0$  bis  $2,6 \text{ kg/dm}^3$
- Schwerbeton:  $>2,6 \text{ kg/dm}^3$

Der heute normativ geregelte Leichtbeton wird in sechs Rohdichteklassen von D1,0 bis D2,0 eingeteilt (siehe Tabelle 15). Die standardmäßig festgelegten Leichtbetone entsprechen einer Rohdichte zwischen 800 bis 2 000 kg/m<sup>3</sup>. Für die Herstellung von Leichtbeton gibt es mehrere Möglichkeiten, die eine geringe Rohdichte des Endprodukts ermöglichen<sup>30</sup>:

- Gefügedichter Leichtbeton mit Kornporosität
- Porenleichtbeton
- haufwerksporiger Leichtbeton mit dichter oder poröser Gesteinskörnung
- Porenbeton

Für die Herstellung können also Leichtzuschläge, Betonzusätze oder eine angepasste Zuschlagszusammensetzung verwendet werden, welche alle Luftporen in den Beton einbringen und dadurch eine annähernd gleichmäßige Porosität des Gesamtgefüges erzeugen. Insbesondere der gefügedichte Leichtbeton findet ein breites Anwendungsspektrum, da durch die porösen Zuschläge die Festigkeit von Zementleim und Zementstein in ähnlicher Art und Weise wie bei Normalbeton beibehalten werden kann und ein festes Gefüge entsteht.

Der gefügedichte Leichtbeton ist normativ geregelt durch DIN EN 1992-1-1: Bemessung von Stahlbeton und Spannbetontragwerken in Verbindung mit dem zugehörigen Nationalen Anhang und DIN EN 206 bzw. DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Die Mischungszusammensetzung entspricht einem Normalbeton mit Ausnahme der Zuschlagstoffe. Hier werden Teile der schweren Zuschlagstoffe (z. B.: Kies und Sande) durch deutlich leichte Gesteinskörnungen ersetzt. Diese leichten Gesteinskörnungen können beispielsweise Blähton, Blähsteiner, aufgeschäumtes Glas oder Naturbims sein. Entscheidend ist, dass Sie eine geringe Rohdichte aufweisen und sich nicht negativ auf den Reaktionsprozess im Beton auswirken.

Daher können unter Berücksichtigung von statisch konstruktiv und bauausführungs-technischen Randbedingungen auch Bauwerke mit hohem Lastabtrag in Leichtbeton ausgeführt werden, da das Eigengewicht über die Zuschläge erheblich reduziert werden kann ohne signifikant Festigkeit einzubüßen. Voraussetzung für den Erhalt der Tragfähigkeit ist die Verwendung von druckfesten Zuschlagstoffen.

Das Gesamttragverhalten des Betons, bestehend aus den Traganteilen Gesteinskörnung, Zementstein und deren Verbundwirkung, wird bei gefügedichtetem Leichtbeton anders erklärt als bei Normalbeton. Entscheidend wird dieses abweichende Tragverhalten im Grenzbereich der Bauteiltragfähigkeiten. Auf Grund der geringeren Festigkeit und des niedrigeren Elastizitätsmoduls der leichten Gesteinskörnungen kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass in dem Betongefüge die Zuschlagstoffe die höchsten Festigkeiten besitzen und unter Umständen der Zementstein sogar eine höhere Festigkeit besitzt. Bis zum Grenzbereich der Tragfähigkeit tragen die Leichtzuschläge mit zunehmender Belastung mit, bis sie für die Zementsteinlamellen nur noch aussteifende Wirkung besitzen. Dieser Effekt gilt insbesondere bei der Verwendung von großen und leichten

30 vgl. Zementmerkblatt Betontechnik: Leichtbeton, S.1

**Tab. 15:** Wärmeleitfähigkeit  
(Bemessungswerte nach  
DIN 4108-4) (Quelle:  
Zementmerkblatt Beton-  
technik: Leichtbeton, S. 3)

Rohdichte- klasse	Rohdichte- bereich [kg/m <sup>3</sup> ]	Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_R$ <sup>1)</sup> [W/(m · K)]
D1,0	≤ 900 ≤ 1000	0,44 0,49
D1,2	≤ 1100 ≤ 1200	0,55 0,62
D1,4	≤ 1300 ≤ 1400	0,70 0,79
D1,6	≤ 1500 ≤ 1600	0,89 1,00
D1,8	≤ 1800	1,15
D2,0	≤ 2000	1,35

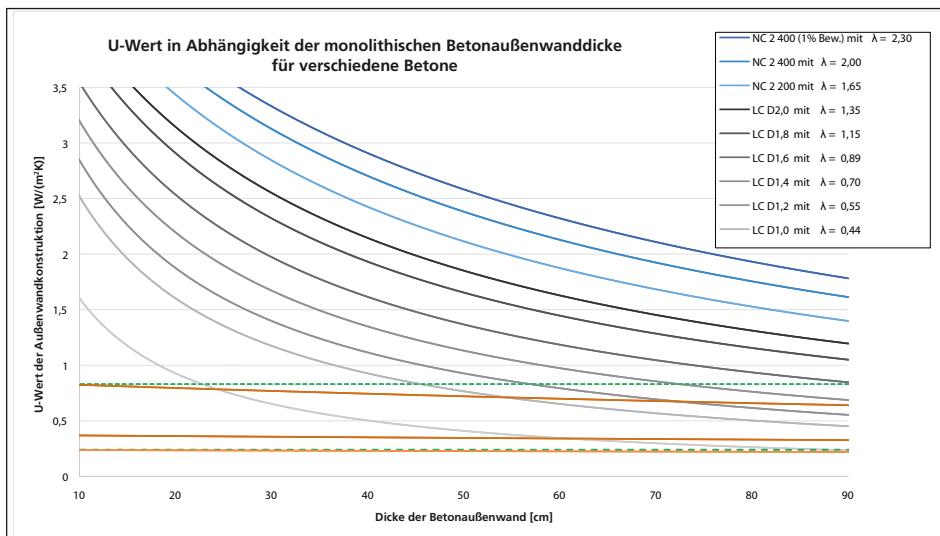
<sup>1)</sup> Werte gelten nur für Gesteinskörnungen mit porigem Gefüge ohne Quarzsandzusatz.

Körnern. Somit gelten für den Zementstein höhere Anforderungen als bei einem Normalbeton der gleichen Festigkeitsklasse.<sup>31</sup>

Der häufigste Grund für den Einsatz eines Betons mit niedriger Rohdichte ist die Steigerung der energetischen Qualität der tragenden Außenwandkonstruktionen. Für diese Anwendungen bietet sich der geringe Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit an, welcher dazu beitragen kann eine geringere Dämmstärke zu verbauen oder bei besonderen Anforderungen oder Betonzusammensetzungen gänzlich auf eine zusätzliche Dämmebene zu verzichten und die Außenhaut des Gebäudes in einer monolithischen Struktur zu errichten. Für die Vorplanung der wärmeschutztechnischen Eigenschaften einer Gebäudeaußenhülle in Beton- und Leichtbetonbauweise sind in Abbildung 72 mehrere Wandaufbauten in Abhängigkeit des zu erreichenden U-Werts dargestellt. In dem Diagramm sind ebenfalls als Referenzwerte die Anforderungen an eine Außenwandkonstruktion für den maximalen U-Wert nach EnEV 2014 mit  $U_{Wand} = 0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  und des Mindestwärmedurchlasswiderstandes nach DIN 4108-2 mit 1,2 (m<sup>2</sup> · K)/W, welcher einem Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von 0,83 W/(m<sup>2</sup> · K) entspricht. Verglichen werden diese monolithischen Wandaufbauten mit gedämmten Konstruktionen (Abbildung 72, orangene Kurven).

Der Leichtbeton besitzt wie jeder Baustoff, also auch Dämmstoff, eine abnehmende Effektivität mit zunehmender Schichtdicke. Aus Abbildung 72 kann entnommen werden, dass die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz mit einem monolithischen Bauteil aus Leichtbeton der Klasse D1,0 bereits mit einer Bauteildicke von 45 cm erfüllt werden. Bei einer Schichtdicke von ungefähr 55 cm entspricht die energetische Qualität der Außenwandkonstruktion mit Leichtbeton (D1,0) einer konventionell hergestellten Stahlbeton-

31 vgl. Zementmerkblatt Betontechnik: Leichtbeton, S. 2



**Abb. 72:** Mögliche Ausführungsvarianten von Gebäudeaußenwänden mit Leichtbeton im Vergleich zu konventionellen Ausführungen mit einer Trennung von Dämm- und Tragkonstruktion

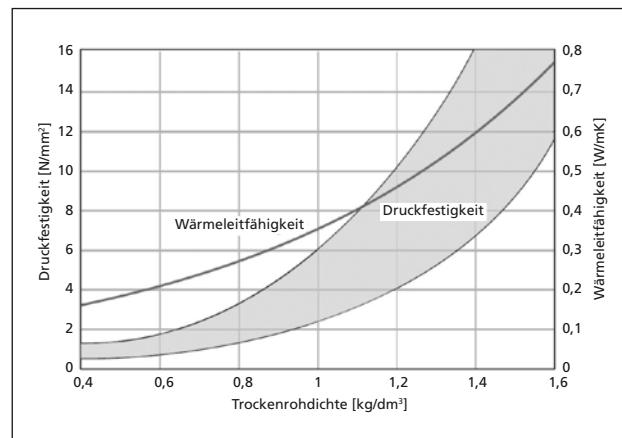
wand mit einer Dämmsschichtdicke von 4 cm. Für diese Vergleichsrechnung wurde eine Wärmeleitfähigkeitsgruppe der Dämmung von 040 angesetzt.

Auf Grund der monolithischen Bauweise kann sich auch bei größeren Wandstärken eine wärmedämmende Verbesserung ergeben und es können äußerst gute U-Werte erreicht werden. Die Bewertung über den Wärmedurchgangskoeffizienten zeigt sogar, dass bei energetisch sehr leistungsfähigen Infraleichtbetone mit einem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit von unter 0,23 W/(m · K) in Verbindung mit einer dicken Wandkonstruktion die Anforderungen an die heutige Energieeinsparverordnung (EnEV 2014) ohne zusätzliche Wärmeschutzschichten erreicht werden können. Jedoch sind solche Wandstärken für die meisten Nutzungsanforderungen sehr praxisfern, sodass sich im Idealfall eine Grundkonstruktion aus Leichtbeton in Verbindung mit einer zusätzlichen Dämmsschicht als sinnvoll erweisen kann.

Ein anderer Blickwinkel auf die Gebäudedämmungen lässt den Schluss zu, dass ein energetisch optimales Gebäude nicht nur von der Stärke der Dämmebene abhängt, sondern vielmehr von der Effektivität und dem damit verbundenen Wirkungsgrad von vielen kleinen sich ergänzenden Einzelmaßnahmen. In diesem Kontext kann eine effektive Wirkung sich bereits bei sinnvoll geplanter monolithischer Bauweise mit leicht erhöhter Wandstärke zeigen.

Bei einer zielorientierten Planung mit Leichtbeton muss daher zwingend berücksichtigt werden, dass bei abnehmender Rohdichte der E-Modul als Materialkennwert im linear-elastischen Bereich überproportional abnimmt. Dadurch ergeben sich verminderte Tragfähigkeiten und größere Verformungen infolge von Belastungen. Eine Koordination zwischen den einzelnen Planern ist daher zwingend notwendig. Ebenfalls werden mit Abnahme der Rohdichte die Schallschutzeigenschaften schlechter und auch das Wasser-eindringvermögen wird erhöht, wodurch das Bauteil anfälliger für Feuchteschäden und

**Abb. 73:** Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Porenleichtbeton in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte (Quelle: HeidelbergCement)



Bewehrungskorrosion wird. Abhilfe für das Eindringen von Feuchtigkeit ist über zusätzliche äußere Schutzschichten auf der fertigen Bauteiloberfläche zu schaffen, dafür bieten sich Anstriche als Schutzschicht an, welche das äußere Erscheinungsbild der Betonoberfläche nicht beeinträchtigen.

Der Porenleichtbeton wird, anders als der gefügedichte Leichtbeton, mit einer Porosität in der Gefügestruktur hergestellt. Dafür wird planmäßig mit einem erhöhten Luftporengehalt im Frischbeton gearbeitet. Dieser beläuft sich in der Regel auf mehr als 30 Volumenprozente. Für die Ausgangsstoffe wird eine normale Mischungszusammensetzung gewählt, allerdings meistens mit einer Gesteinskörnung bis zu 2 mm Durchmesser, um eine annähernd gleichmäßige Verteilung der Poren im erhärteten Endprodukt zu erhalten. Als Zusatzmittel wird dem Frischbeton ein Schaumbildner oder Schaum hinzugefügt. Dadurch wird zwar eine Porosität erreicht, jedoch geht das auch mit einer Schwächung der kompletten Gefügestruktur einher. Aus diesem Grund ist der Porenleichtbeton, auch Schaumbeton genannt, nicht normativ geregelt und kann daher auch nicht pauschal für alle Anwendungsbereiche verwendet werden. Jedoch lässt sich über die Zugabe des Schaums oder des Schaumbildners der Porengehalt genau einstellen. In Abhängigkeit der Zugabe wird dann die Rohdichte kalibriert, wodurch im Planungsprozess direkt die Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit prognostiziert werden kann (siehe Abbildung 73). Dabei sollte für die ganzheitliche Planung berücksichtigt werden, dass Kriechen und Schwinden mit abnehmender Rohdichte zunehmen.

Typische Anwendungsgebiete für den Porenleichtbeton sind Fälle bei denen eine gute Fließfähigkeit, niedriges Gewicht und eine niedrige Wärmeleitfähigkeit gefordert sind und die Tragfähigkeit nur eine untergeordnete Rolle spielt. Häufige Nutzung erfolgt daher in folgenden Bereichen<sup>32</sup>:

- Verfüllungen von Rohrleitungen, Kanälen, Gräben, Stollen oder ähnlichem
- Ausgleichsschichten

32 Quelle: [http://beton-technische-daten.de/12/12\\_12.htm](http://beton-technische-daten.de/12/12_12.htm) (aufgerufen am 20.10.2014)

- Aufbetone auf bestehende Tragwerke und Tragkonstruktionen
- Wärmedämmsschichten in der Altbausanierung
- Tragschichten unter Industrieböden

## 5.4.2 Dämmbeton

Durch die Kombination der Eigenschaften Tragstruktur und Energieschutz ist es möglich homogene Außenwände und Dachkonstruktionen herzustellen, die in Leichtbeton, Dämmbeton – auch als Isolationsbeton bezeichnet – gefertigt werden können. Bei der Kombination aus Tragkonstruktion und Wärmeschutzschicht entsteht somit ein monolithisches Bauteil mit wärmedämmenden Eigenschaften. Gelegentlich wird auch der Name Infraleichtbeton benutzt, um die Rohdichte-Einordnung des Betons unterhalb der standardmäßigen Leichtbetonklassen zu verdeutlichen. Somit liegen diese Betone auch außerhalb des normativ geregelten Bereichs. Diese nicht vollständige Regelung erfordert zusätzliche planerische Maßnahmen, um in Deutschland mit Dämmbeton bauen zu dürfen.

Dämmbeton ist ein gefügedichter Leichtbeton, wobei die entsprechenden Leichtzuschläge von der Zementmatrix vollständig eingeschlossen werden. Eigentlich eignet sich offenporiger Leichtbeton durch das offene Gefüge besser für den Einsatz als wärmedämmender Leichtbeton, jedoch können diese Betone im konstruktiven Bereich wegen der geringen Druckfestigkeit nur sehr bedingt eingesetzt werden. Durch den Einsatz von Glasschaum-Granulat wird eine Kombination aller Eigenschaften aus Beton und Glasschaum-Granulat erreicht und ergibt einen neuen Baustoff mit beachtlicher Druckfestigkeit.

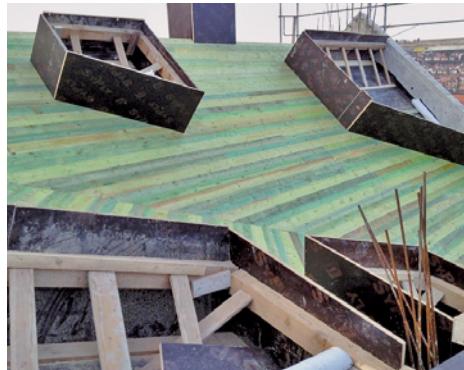
Glasschaum-Granulat (auch bekannt als Glasschaumschotter oder Schaumglasschotter) ist ein Recycling Baustoff aus Altglas. Dadurch hat der Ausgangsstoff für den Dämmbeton bereits in der Herstellung ein enormes ökologisches Einsparpotenzial aktiviert und nachhaltig die Ressourcen geschont. Diese Form des Recyclings kann auch als Upcycling bezeichnet werden, da Abfallprodukte oder nutzlose Stoffe in neuwertige Produkte umgewandelt werden und dadurch eine stoffliche Aufwertung entsteht. Das Glasschaum-Granulat wird durch Aufschäumen von geschmolzenem Altglas erzeugt. In einem



**Abb. 74:** Aufgeschäumter Glasschotter als Dämmstoff und Zuschlagstoff für Leichtbetone



**Abb. 75:** Betonage des Dachs von Haus 36 (MBA/S, Stuttgart)



**Abb. 76:** Schalung der Dachkonstruktion mit Lichtenausschnitten von Haus 36 (MBA/S, Stuttgart)

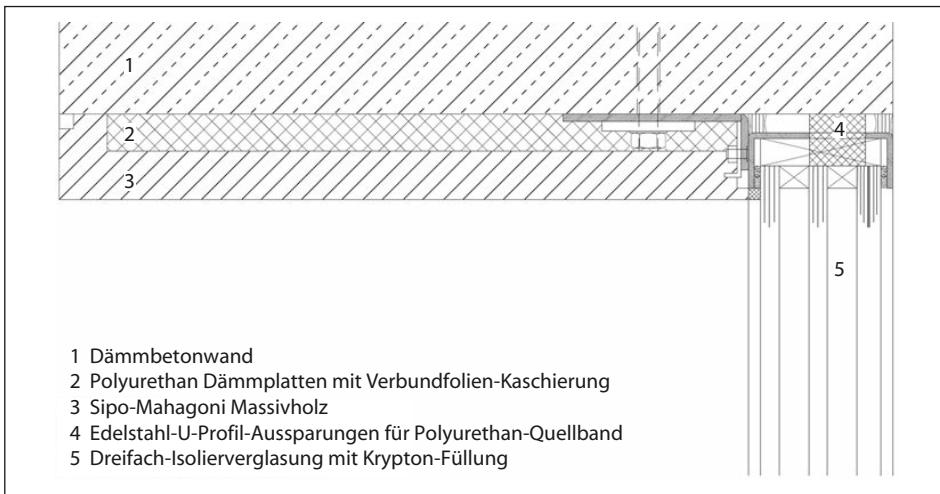
sogenannten Blähofen wird das geschmolzene Ausgangsprodukt bei ca. 800 °C aufgeschäumt.

In dem von MBA/S, Matthias Bauer Associates – Stuttgart, realisierten Wohnhausprojekt *Haus 36*, welches mehrfach mit renommierten Architekturpreisen ausgezeichnet wurde, ist zum ersten Mal in Deutschland ein Gebäude mit einer Außenhülle aus Dämmbeton entstanden. Dabei sind alle sichtbaren Wände und das Dach des prismatischen Baukörpers fugenlos ausgeführt worden, um so vollständig auf ein Wärmedämmmaterial zu verzichten. Durch das Ziel, eine monolithische Gebäudehülle zu errichten, sind die Außenwände und das Dach mit Dicken zwischen 45 und 50 cm ausgeführt worden. Bei diesem Projekt, das vollständig in Ort betonbauweise erstellt wurde, sind dadurch U-Werte von 0,41 bis 0,45 W/(m<sup>2</sup> · K) erreicht worden.

Um die zum Planungszeitpunkt gültige Energieeinsparverordnung 2009 (EnEV 2009) zu erfüllen, wurden zur Kompensation höhere Anforderungen an die transparente Gebäudeaußenhülle notwendig. Dieser energetische Ausgleich erfolgte über eine dreifach Verglasung, die teilweise mit Kryptonfüllung und einem U-Wert in der Glasmitte von 0,37 W/(m<sup>2</sup> · K) ausgeführt wurde. Daraus ergab sich für die Anschlusspunkte (siehe

**Abb. 77:** Nordwest-Ansicht von Haus 36 (MBA/S, Stuttgart)

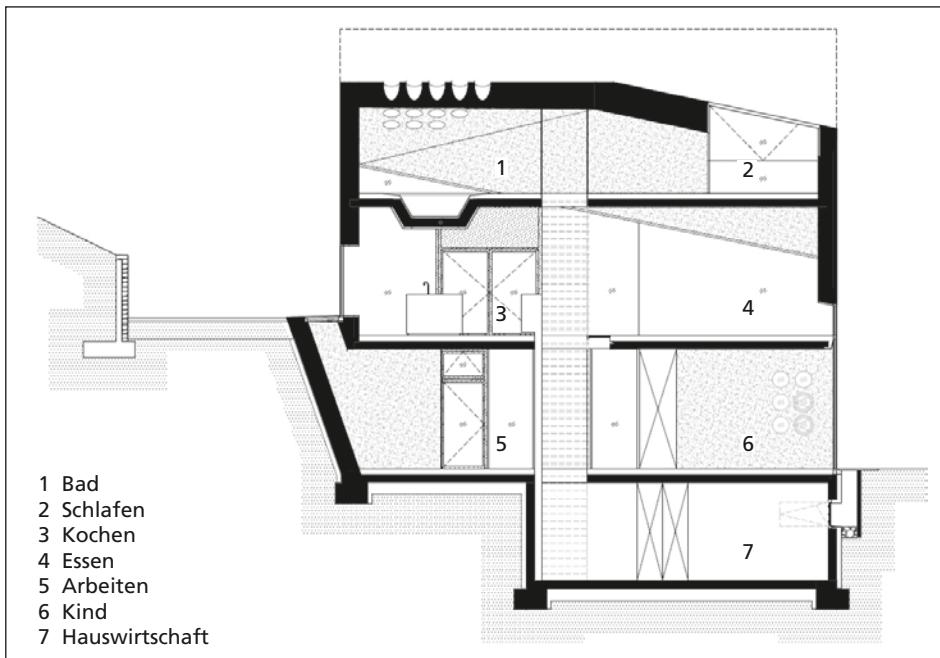




**Abb. 78:** Anschlussdetail Dämmbeton – Fenster mit Dreifach-Isolierverglasung (Haus 36, MBA/S, Stuttgart)

Abbildung 78) ebenso die Anforderung, die mittleren Fassadendämmwerte von  $0,52 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  für Glas und Rahmen abzudecken.

Die Wärmeschutzwirkung wird durch die massive Dämmbeton-Außenwand erreicht. Dafür ist anteilig als Zuschlagstoff Schaumglas-Granulat anstelle von Kies eingesetzt



**Abb. 79:** Gebäudeaußenhülle von Haus 36 im Vertikalschnitt (MBA/S, Stuttgart)

worden und darüber hinaus enthält die Zementmatrix einen Luftporenanteil von bis zu 20 Prozent. Zusätzlich wird bei der mittleren Wandstärke von 45 cm ein sehr gutes Raumklima, wegen des innenseitig diffusionsoffenen Betons, erreicht. Die Außenwandkonstruktion kann somit für einen Feuchtigkeitsausgleich sorgen ohne die Konstruktion zu schädigen.

## 5.5 Ökologische Betrachtungsmöglichkeiten von Baustoffen

Aufgrund der aktuellen baulichen Anforderungen und gesellschaftlichen Zielen, findet kaum noch eine ausschließlich auf die Ökonomie bezogene Betrachtung von Baustoffen und Planungen statt. Vielmehr rückt eine ganzheitliche Bilanzierung zur Bewertung der Planung in den Vordergrund. In diesem Zusammenhang umfasst das ganzheitliche umweltverträgliche Bauen eine nachhaltige Ausrichtung von Bauprodukten und Bauprozessen, welche gezielt auf unsere Anforderungen und die Umweltbedürfnisse zugeschnitten ist. Dabei sollen weder Natur noch Mensch eine Beeinträchtigung erfahren.

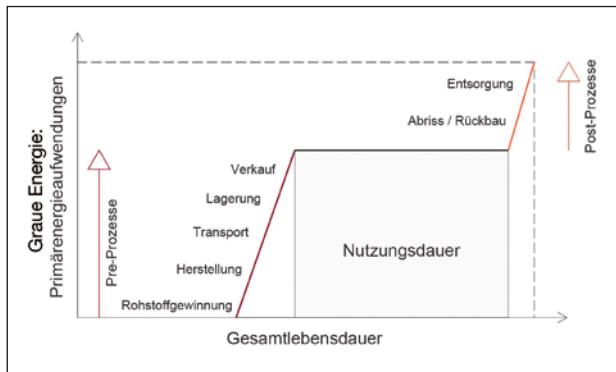
Um eine qualitative Bewertung der Ökologie, Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit von Baustoffen und Bauprodukten durchführen zu können, sind in den vergangenen Jahren verschiedene Zertifizierungssysteme, wie z. B. DBNB, LEED, Breeam oder Minergie, zum nachhaltigen Bauen entstanden.

Weltweit betrachtet zählt der Baubereich zu den energieintensivsten Bereichen der Wirtschaft. Im Abbau und der Umwandlung der Grundstoffe zu Baustoffen steckt ein hoher Energieaufwand. Demzufolge bildet die Bewertung des Energiebedarfs bei der Herstellung und des Transports ein zentrales Thema in einer ganzheitlichen Bilanzierung. Nach Reuscher verursachen allein die Zementwerke jährlich einen CO<sub>2</sub>-Ausstoß, der eine Größenordnung von 5 % des gesamten weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes beträgt. In absoluten Zahlen entspricht das ca. zwei Milliarden Tonnen [34].

### 5.5.1 Graue Energie von Baustoffen

In den vergangenen Jahren wurde zur Beurteilung einer umweltgerechten oder nachhaltigen Bauweise oder Sanierungsmaßnahme häufig nur die Baumaßnahme als solche betrachtet. Angrenzende Prozesse, die im Vorfeld geleistet werden müssen, um überhaupt die Bauprodukte bereitzustellen, waren nicht Teil einer ganzheitlichen Betrachtung.

Für heutige Bauprozesse spielen die Entfernung der Anlieferung von Materialien nur eine untergeordnete Rolle, da wir in den industrialisierten Ländern über eine gute Infrastruktur mit ausgeprägtem Logistiknetz verfügen. Im Gegensatz dazu wurden früher Bauweisen gewählt, welche auf den regional zur Verfügung stehenden Herstellungsketten, Baustoffen und Produktionsmöglichkeiten beruhten, um den Logistikaufwand möglichst gering zu halten und gleichzeitig einen genauen Überblick über die Verfügbarkeit der benötigten Materialien zu haben. Damit wurden aufwendige Prozesse nach Möglichkeit vermieden und folglich liegt nur ein kleiner Anteil Grauer Energie im Vergleich zur direkt verwendeten Energie für den Betrieb und Unterhalt eines Gebäudes vor. Bei einer auf die Zukunft ausgerichteten Bauweise mit einem niedrigen Energieverbrauch während



**Abb. 80:** Graue Energie, Anteil der Primärenergieaufwendung in der Gesamtlebensdauer

der Nutzungsdauer, wird die Graue Energie jedoch immer bedeutsamer und kann in Planungsprozessen nicht außer Acht gelassen werden. In welcher Form die Einbeziehung stattfindet ist jeweils dem Projekt individuell anzupassen.

Daher muss für eine ganzheitliche Betrachtung auch die sogenannte Graue Energie berücksichtigt werden, welche in den vor- und nachgelagerten Schritten eines Produktes (siehe Abbildung 80) benötigt wird. Für die Berechnung des Grauen-Energie-Anteils eines Baustoffes muss die Summe aller nichterneuerbaren Primärenergieträger und energetisch nutzbaren fossilen Rohstoffe sowie der Wasserkraft berücksichtigt werden.<sup>33</sup>

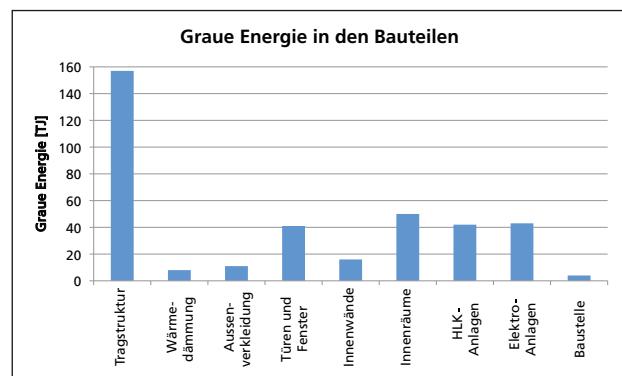
Berücksichtigte Energieträger	Nicht berücksichtigte Energieträger
Erdöl, Erdgas, Kohle und alle daraus gewonnenen Energieträger und Rohstoffe mit dem Energiewert aus der Verbrennung	Holz, Kork und andere pflanzliche und tierische Rohstoffe, sowie daraus gewonnene Energieträger, soweit sie aus nachhaltiger Bewirtschaftung stammen
Natururan mit der in Leichtwasserreaktoren nutzbaren Wärme	Sonnenenergie, Erdwärme, Windenergie, Umgebungswärme und alle daraus gewonnenen Sekundärenergieformen
Wasserkraft mit der auf der Turbinenschaufel nutzbaren mechanischen Energie	Altkunststoff, Altpapier, Altreifen, Klärschlamm, und andere Abfälle, die stofflich oder energetisch wiederverwertet werden

**Tab. 16:** Energieträger für die Berechnung von Grauer Energie (Quelle: BMUBNR)

Jedoch sind im Hinblick auf die Bewertbarkeit mit dem Kriterium »Graue Energie« Grenzen gesetzt, da es keine Standardisierung gibt, die eine Vergleichbarkeit der Einzelwerte sicherstellt. Somit finden die Art der Bewertung der Energieträger und die Grenzen des betrachteten Systems immer innerhalb eines gewissen Spielraums statt. Insbesondere im direkten Vergleich sollte darauf geachtet werden, gleiche Bewertungsmaßstäbe innerhalb der Berechnung zu setzen.

33 Quelle: BMUBNR: [www.wecobis.de/service/lexikon/graue-energie-lex.html](http://www.wecobis.de/service/lexikon/graue-energie-lex.html) (abgerufen am 27.10.2014)

**Abb. 81:** Graue Energie in den Bauteilen (Quelle: WTA)



Früher bestimmten regional ausgerichtete Bauweisen das Erscheinungsbild der Gebäude in den Dörfern und Städten, welche auf den zur Verfügung stehenden Herstellungsketten, Baustoffen und Produktionsmöglichkeiten beruhten. Aufwendige Herstellungs- und Transportprozesse wurden nach Möglichkeit vermieden und es lag folglich nur ein kleiner Anteil Grauer Energie im Vergleich zur direkt verwendeten Energie für den Betrieb und Unterhalt eines Gebäudes vor. Bei einer auf die Zukunft ausgerichteten Bauweise mit niedrigem Energieverbrauch während der Nutzungsdauer wird die Graue Energie jedoch immer bedeutsamer und kann in Planungsprozessen nicht außer Acht gelassen werden. In welcher Form die Einbeziehung stattfindet ist jeweils dem Projekt individuell anzupassen.

In welchen Gebäudeteilen und in welchem Gewerk die meiste Graue Energie anfällt, ist sehr unterschiedlich. Jedoch ist, wie in Abbildung 81 dargestellt, in der Regel der größte Anteil durch die Tragstruktur in einem Gebäude gebunden.

Als weiterer entscheidender Maßstab muss die gesamte Lebensdauer mit in die Überlegungen zu den Anteilen der Grauen Energie einfließen. So erstreckt sich die Lebensdauer der Tragstruktur in den meisten Teilen auch über die Lebensdauer des gesamten Gebäudes, hingegen werden Bodenbeläge, Fenster oder auch große Teile der Anlagen-technik im Gebäude. Häufig mehrmals über die gesamte Lebensdauer ausgetauscht.

Daher ist insbesondere bei einer Grauen-Energie-orientierten Planung der Einbau von Verschleißmaterialien besonders zu beachten, da diese während der Lebensdauer eines Gebäudes meist mehrmals erneuert werden.

Aber auch die Gebäudeform und die Gebäudegröße können Einfluss auf die Graue Energie nehmen. Ein großer Teil der Grauen Energie ist in der Fassade und der Außenkonstruktion eines Gebäudes enthalten, daher können über die Form und Größe eines Gebäudes die Anteile der Grauen Energie erheblich beeinflusst werden. Dafür kann in Planungsprozessen die Kompaktheit als Maß herangezogen werden, diese ergibt sich aus dem Verhältnis der Gebäudeoberfläche zum Gesamtvolumen. Je kompakter ein Gebäude ist (geringes Verhältnis Oberfläche zu Volumen), desto kleiner wird der Anteil an der Gebäudeaußenhülle. [23]

Gleichzeitig mit der geringeren Grauen Energie, die für ein kompaktes Gebäude anfällt, sinkt auch die wärmeumhüllende Umfassungsfläche. Als positiver energetischer

### Primärenergieeinsatz zur Herstellung von Dämmstoffen

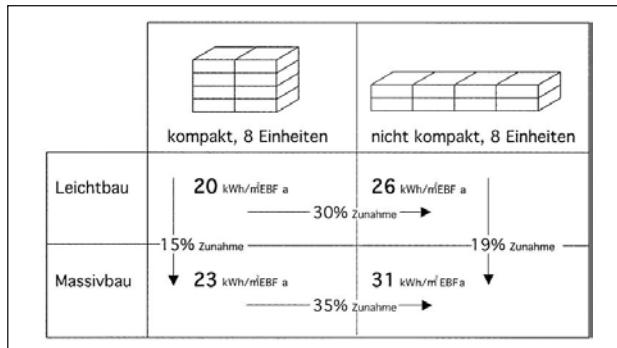
Zellulose – Dämmstoff (Schüttware)	10–60 kWh/m <sup>3</sup>
Holzwolle – Leichtbauplatten	35–95 kWh/m <sup>3</sup>
Glaswolle	40–1 167 kWh/m <sup>3</sup>
Zellulose – Platten	55–80 kWh/m <sup>3</sup>
EPS – expandierte Polystyrolplatten	190–1 050 kWh/m <sup>3</sup>
Steinwolle	270–986 kWh/m <sup>3</sup>
Schaumglas	320–975 kWh/m <sup>3</sup>
Korkplatten künstlich gebunden	360–440 kWh/m <sup>3</sup>
XPS – extrudierte Polystyrolplatten	470–1 032 kWh/m <sup>3</sup>
Holzfaserdämmung – lose	600–785 kWh/m <sup>3</sup>
Polyurethanplatten	838–1 330 kWh/m <sup>3</sup>

**Tab. 17:** Primärenergieeinsatz zur Herstellung unterschiedlicher Dämmstoffe (Quelle: Energieagentur NRW)

Nebeneffekt fallen aufgrund der geringeren Außenwand und Dachflächen in der Nutzungsphase geringere Transmissionswärmeverluste an.

Für die Entscheidung, ob ein Gebäude in Massivbau- oder Leichtbauweise (Holzrahmen- und Holzständerbau) ausgeführt werden soll, kann ebenfalls das Kriterium der Grauen Energie herangezogen werden. Insbesondere bei einer energieeffizienten Bauweise im Passivhausstandard oder im Niedrigenergiebereich sind die Anteile der Grauen Energie ungefähr zwei- bis dreimal so hoch wie der Heizwärmebedarf [23]. Massivbauten benötigen zudem etwa ein Fünftel mehr Graue Energie als Leichtbauten [32]. In Abbildung 82 sind die Gebäudeform und die Ausführung exemplarisch an einem Beispielgebäude mit acht Einheiten dargestellt. Dort lassen sich die Vorteile einer Kompakt- und Leichtbauweise deutlich erkennen.

Da aktuell die Planungs- und Berechnungsunsicherheiten noch zu groß sind, empfiehlt es sich eine Gebäudeplanung nicht ausschließlich auf die Argumentation zu stützen, dass



**Abb. 82:** Graue Energie von Passivhäusern in Leicht- und Massivbauweise: kompakte und nicht kompakte Gebäudevolumen im Vergleich (Quelle: Hansruedi Preisig)

möglichst wenig Graue Energie in das Gebäude einfließt. Die Anteile an Grauer Energie werden bereits in verschiedenen anderen Nachhaltigkeitsbewertungen mitberücksichtigt, sodass beispielsweise bei der Bewertung über eine Ökobilanz die Produktion und Bereitstellung in der Wertschöpfungskette Eingang finden.

## 5.5.2 Wartung und Recycle-Fähigkeit

Wartung und die Fähigkeit zum Recycling hängen stark von der Art des Baustoffes ab und wie dessen Zustand ist. Im Regelfall sind sortenreine Bauabfälle leichter wiederverwenden als Verbundstoffe, bei denen erst eine Trennung erfolgen muss. Dieser Umstand beeinflusst den Wiedereinsatz von Baustoffen, aus denen im Recyclingverfahren neue Ressourcen für eine weiterführende Nutzung entstehen können.

In einem relativ rohstoffarmen Land wie Deutschland bilden diese Stoffe eine Grundlage zur Weiternutzung. Eine 2014 erschienene Kurzanalyse des VDI ZRE<sup>34</sup> besagt, dass 2010 ca. 106 Millionen Tonnen aus Bodenaushub, Steinen und Baggergut sowie weitere 53 Millionen Tonnen Bauschutt in Deutschland anfielen.<sup>35</sup> Insgesamt standen 187 Millionen Tonnen mineralischen Bauabfalls zur Verfügung, die als möglicher Sekundärrohstoff genutzt werden könnten. Zum Vergleich lag daneben der Bedarf an mineralischen Baustoffen in 2008 bei 580 Millionen Tonnen Kies, Sand und gebrochenen Natursteinen, sowie 28 Millionen Tonnen Zement.

Im Rahmen der immer bedeutender werdenden Ökobilanzierung von Gebäuden werden die Aspekte des Energieaufwands für Herstellung und Recycling immer prägender im Bewertungsverfahren. Dies geschieht unmittelbar durch die Bewertung des Treibhauspotenzials bzw. der CO<sub>2</sub>-Bilanzierung. Das Recyclingpotenzial von Baustoffen trägt somit unmittelbar zur Reduzierung des Ausstoßes von umweltschädigendem CO<sub>2</sub> bei.

Die üblichste Verwendungsform von Recyclingbaustoffen, wie z. B. Dachpfannen und Wandziegel, ist heute die Nutzung als Zuschlagstoffe zur Herstellung von Beton. Natürlich besteht ebenso die Möglichkeit zur Nutzung des ganzen Bauteils, jedoch ist hier im Normalfall die Reinigung von Verbundbaustoffen sehr aufwendig. Eine relativ positive Bilanz zur Wiederverwendung besitzt u. a. Aluminium. Obwohl Aluminium zu den energieintensivsten Baustoffen in der Herstellung zählt, ist das Potenzial zur Wiederverwendung hoch, da hier nahezu ohne Verlust das gesamte Material wieder eingeschmolzen werden kann.

Anders stellt sich das Potenzial bei den meisten Dämmstoffen dar. Die auf dem Markt am stärksten vertretenen Produkte, wie EPS oder Mineralwollen, sind kaum recyclingfähig, da nach Angaben der Erzeuger nur sortenreines und damit nicht verschmutztes Dämmmaterial dem Stoffkreislauf wiederzugeführt werden kann. Das heißt die Dämmplatten müssen frei von Klebe- und Putzresten sein. Andernfalls können sie keinem Recycling durch einen erneuten Einbau zugeführt werden. Bei den Mineralwollen galt bisher die Deponierung alter Dämmstoffe als einziger Entsorgungsweg. Aber auch hier

34 vgl. VDI Zentrum für Ressourceneffizienz: Kurzanalyse Nr. 8; Potentiale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich, Juni 2014

35 ebd. S. 7; zitiert aus: Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2010 – Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle, S. 6

wurden durch die Hersteller mittlerweile Rücknahmesysteme aufgebaut, die jedoch ebenfalls nur sortenreine Mineralwollen annehmen.

Daher benennen die Hersteller von EPS-Dämmstoffen das Verbrennen von EPS als die eigentliche Form der energetischen Wiederverwendung. Bei dieser Betrachtungsweise wird der Grundstoff Mineralöl als eingespeicherte Energie betrachtet.

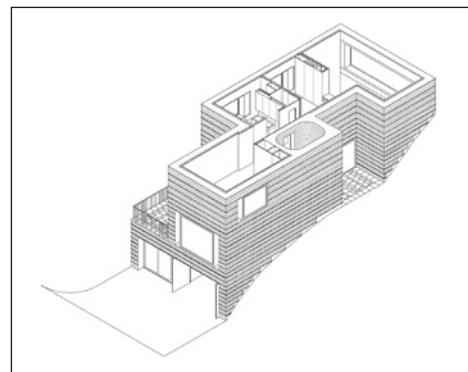
### 5.5.3 Lehm und Stroh – Rückgriff auf regionale Baustoffe

Bedingt durch die Anforderungen zu einer ganzheitlichen Betrachtungsweise beim Bau von Gebäuden erlangte, neben den energetischen Zielen, auch die Bewertung zum Energieaufwand beim Abbau sowie Transport und Wandlung des Rohstoffs immer größere Bedeutung. Diesem Ansatz der ganzheitlichen Energie- und Ressourcenoptimierung folgt das Wohnhaus Rauch in Schlins im Vorarlberg, das zu 85 % aus dem eigenen Bauaushub errichtet wurde.<sup>36</sup> Das örtliche Lehmvorkommen im eigenen Baugrund wurde für den Bau aufbereitet. Der Lehmaushub wurde vorher gesiebt und fraktioniert, um danach wieder als Stampflehm für die Wände eingebaut zu werden. Weiterer Lehm wurde gebacken, gespritzt oder verspachtelt eingebaut. Die Decken wurden bezogen auf die Anforderungen unterschiedlich konstruiert. So wurde die Decke des Flachdachs als »Doppelbalkendecke« ausgeführt. Bei diesem traditionellen Deckensystem werden unterschiedlich große Hölzer dicht gestoßen und verdübelt verlegt. Auf diese Tragschicht wurde oberseitig eine Korkschorf-Trass-Lehm Mischung, 20 cm Schilfmatten und Schichtplatten mit einer zweilagig verlegten Dachabdichtung aus Bitumenbahnen aufgebracht. Darauf folgte dann eine Schüttung aus Lavaschotter, die den Unterbau für den Terrassenbelag aus Schlammziegel bildet.

Die Dämmung der Wände erfolgte innenseitig mit Schilf auf dem ein 3 cm starker Lehmputz mit einer Wandheizung aufgebracht wurde. Die Bewertung der U-Werte der Bauteile basierte auf den in Tabelle 9 benannten Wärmeleitfähigkeiten von Lehmkonstruk-



**Abb. 83:** Seitenansicht Wohnhaus Rauch  
(Quelle: Boltshauser Architekten)



**Abb. 84:** Axonometrie Obergeschoss (Quelle: Boltshauser Architekten)

36 vgl. [31], S. 227

Material	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/m · K]	Hinweis
Schilfrohdämmung	0,056	Literaturwert
Schilfrohdämmung	0,042	Laborwert
Stampflehm 1900 kg/m <sup>3</sup>	1,0	Literaturwert Lehm
Stampflehm 1500 kg/m <sup>3</sup>	0,65	Aushub Lehm

**Tab. 18:** Materialkennwerte der genutzten Baustoffe gemäß der Studie der Hochschule Luzern

tionen. Nach den Lehmhaus-Regeln stehen die Wärmeleitzahlen in Abhängigkeit zur Trockenrohdichte [kg/m<sup>3</sup>]. Danach sind Wärmeleitzahlen von  $\lambda = 0,10$  W/(m · K) bei 300 kg/m<sup>3</sup> Trockenrohdichte bis  $\lambda = 1,40$  W/(m · K) bei 2 200 kg/m<sup>3</sup> Trockenrohdichte möglich [37]. Für Stampflehm, wie er am Haus Rauch verwendet wurde, kann von einer Rohdichte von 1 700–2 400 kg/m<sup>3</sup> ausgegangen werden. Nach Schoeder resultieren daraus Wandstärken im einfachen Berechnungsverfahren für den Nachweis zur Standsicherheit von 32,5 cm für Stampflehmkonstruktionen und 36,5 cm bei Verwendung von Lehmsteinen.

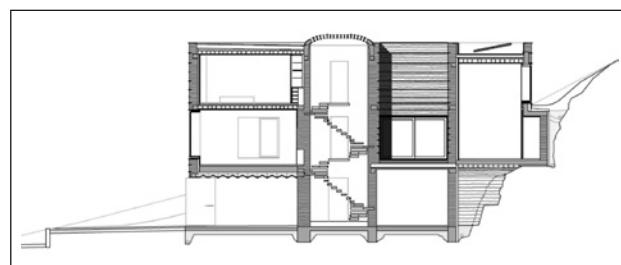
Für das Wohnhaus Rauch wurde ein Wandaufbau gewählt, der Wandstärken bis 60 cm besaß. Hieraus resultierte, dass ca. 30 % der Grundfläche als Konstruktionsfläche genutzt werden musste. Da Wandheizungen in Heizungsanlagen mit geringen Oberflächentemperaturen eingebunden werden, besteht die bivalente Heizungsanlage aus einem Solarkollektor, der einen Holzpelletofen unterstützt. In Abhängigkeit von den äußeren Bedingungen liegt die Vorlauftemperatur zwischen 26 und 30 °C<sup>37</sup>, was wiederum zu angenehmen Oberflächentemperaturen der Bauteile führt.

Die Dämmung der erdberührten Bauteile erfolgte von außen. In diesen Fällen wurden auf die tragende Kelleraußenwand aus Stampflehm eine Bitumenabdichtung und eine Dämmung aus Schaumglas aufgebracht.

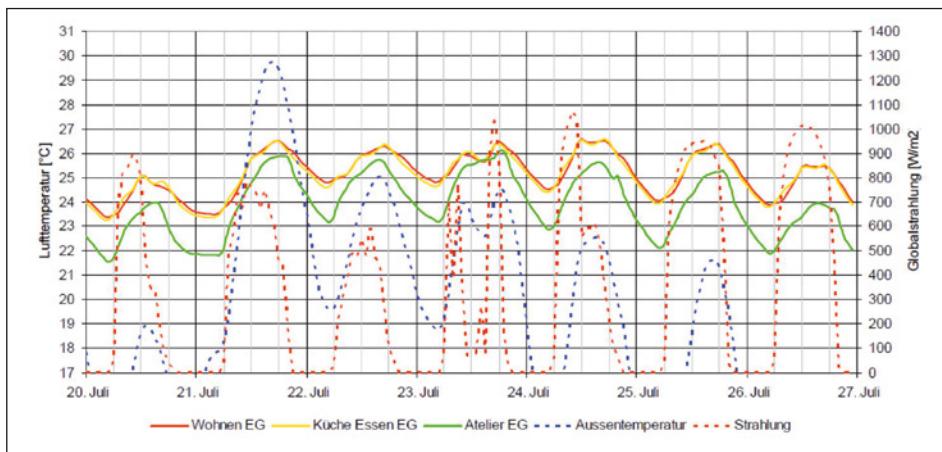
Da Lehm ein dauerhaft wasserlöslicher Baustoff ist, entwickelten die Planer für die Außenwände ein Detail mit eingelassenen Schlammziegeln, die als Erosionsschutz dienen. Mit dem Einbau der Schlammziegel gelang es ein gestalterisches Element einzuplanen, das dazu beiträgt, die Gebrauchstauglichkeit der Wand sicherzustellen. Durch die Einteilung in viele kleine horizontale Schichten verringerte sich die Einwirkung des Regens auf diese Fassade und damit eine Auswaschwirkung, die sich über die Höhe aufbaut. Zudem

**Abb. 85:** Schnitt durch das

Wohnhaus Rauch (Quelle:  
Boltshauser Architekten)



<sup>37</sup> vgl. [37], S. 229



**Abb. 86:** Wochenverlauf im Sommer der Lufttemperatur in den Innenräumen des Erdgeschoßes auf der Grundlage von rechnergestützten Simulationen (Quelle: Hochschule Luzern Technik & Architektur).

wirken die auskragenden Schlammziegel wie Tropfnasen, die das Wasser von den Fassaden ableiten. Die Fassade erhielt keine hydrophobierende Ausstattung sondern wurde naturbelassen. Bedingt durch diese Ausführungsweise muss man jedoch auch davon ausgehen, dass dieses Gebäude sich wie alle Lehmhäuser und aufgrund der klimatischen Bedingungen verändern wird und eine eigene Patina entwickelt.



**Abb. 87:** Innenansicht des Übergangs zum Treppenraum (Quelle: Boltshauser Architekten)



**Abb. 88:** Schnitt durch den »monolithischen« Wandaufbau aus Stampflehm, Schlammziegeln als Erosionsschutz und der Innendämmung aus Schilf des Wohnhauses Rauch (Quelle: Boltshauser Architekten).



**Abb. 89:** Schichtaufbau einer Strohballenwand mit mehreren Lagen an Lehmputz und Jutegewebe-einlage

**Tab. 19:** Vergleich des Primärenergiebedarfs für einige übliche Baustoffe  
(Quelle: Schroeder, H.; Lehmbau – Mit Lehmbau ökologisch planen; S. 25)

Baustoff	Primärenergiebedarf PEI [kWh/m <sup>3</sup> ]
Lehm	1–30
Strohplatten	5
Holz (regionaler Abbau)	300
Zement	1 700
Kalksandstein	350
Flachglas	15 000
Aluminium	195 000

Auffallend an dem Wohnhaus Rauch ist der vollständige Verzicht auf einen außenliegenden Sonnenschutz. Hinsichtlich des sommerlichen Verhaltens führte die Hochschule Luzern Simulationen mit dem Programm IDA Klima und Energie 4.0 durch. Diese Simulationen zeigten für den Sommer im Wochenverlauf relativ günstige Ergebnisse. Obwohl alle Räume ohne außenliegenden Sonnenschutz ausgestattet wurden, lagen die Innenraumtemperaturen im Keller- und Erdgeschoß nur kurzzeitig über 26 °C. Im Obergeschoß stiegen die Innenraumtemperaturen nach zwei Tagen kurzzeitig bis auf ca. 28,5 °C und nach sechs Tagen bis auf ca. 30,2 °C.

Eine 2010 durch Boltshauser Architekten in Auftrag gegebene Studie der Hochschule Luzern bezüglich zum Komfort, der Heizenergie und der Grauen Energie am Wohnhaus Rauch zeigte, dass das Wohnhaus Rauch hinsichtlich der Bewertung zur Grauen Energie um 18 % unterhalb eines Vergleichsgebäudes in konventioneller Bauart liegt. Die Studie stellte fest, dass die großen Verbräuche der Grauen Energie u. a. bei der Korkschrotmischung liegen. Die beiden hierfür zusammengefügten Produktgruppen Kork und Trasskalk haben bereits einen Anteil von 25 % der Grauen Energie. Ebenfalls fiel mit der Studie auf, dass die lehmbaubedingten großen Schichtdicken kaum Vorteile gegenüber konventionellen schlanken Bauweisen haben. Obwohl der Lehm vor Ort gewonnen werden konnte, fiel Graue Energie bei der Umwandlung zum Wandbaustoff an. Hierzu gibt die Studie in absoluten Werten zum Energiebedarf für die Erstellung und Entsorgung für den Lehmbau ca. 3 300 MJ/m<sup>2</sup> an. Demgegenüber steht ein ermittelter Bedarf von 4 100 MJ/m<sup>2</sup> bei einer konventionellen Bauweise.

Eine deutliche Verbesserung sah die Studie im Bereich des sommerlichen Raumklimas. Bedingt durch die Nutzung des Baustoffes Lehm, wurden die Raumluftfeuchten im behaglichen Bereich gehalten.



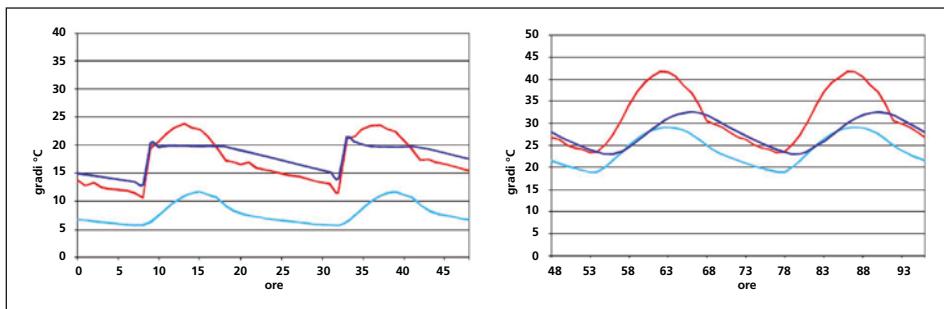
**Abb. 90:** Ansicht der Casa Vallgorguina in der Bauphase

Einem ähnlichen Konzept folgt ein 2008 in Vallgorguina bei Barcelona errichtetes Einfamilienhaus der Architektin Valentina Maini. Das Gebäude besteht aus einer Holzrahmenkonstruktion, dessen Gefache mit Strohballen als Wärmedämmung ausgefüllt wurden. Dieser Aufbau entspricht einer Konstruktionsweise, die erstmals gegen Ende des 19. Jahrhundert in den Vereinigten Staaten angewandt wurde. Die Konstruktion ist eine Kombination aus dem reinen Strohballenbau mit der Holzständerbauweise. Da Stroh ein häufig vorkommendes und regionales Erzeugnis ist, bietet Stroh als Naturbaustoff den ökologischen Vorteil mit einem geringen Energieaufwand für den Hausbau genutzt werden zu können und zudem  $\text{CO}_2$  zu binden. Mit der von der Architektin Maini gewählten Wandstärke erreichten die Wände einen U-Wert von  $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , was einer 50 %-Unterschreitung der heute in Deutschland geltenden EnEV-Anforderungen entspricht.

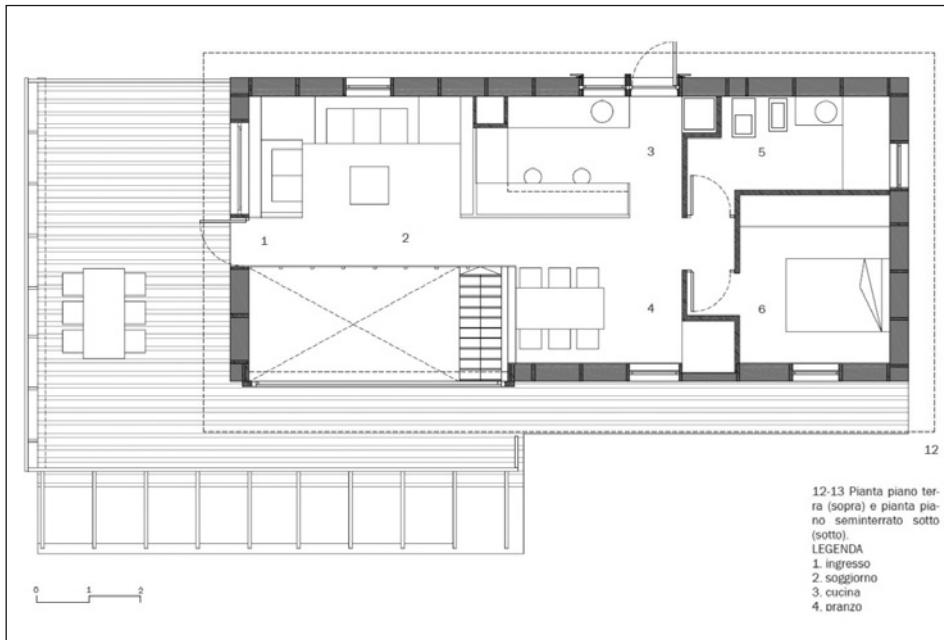
Gemäß der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung<sup>38</sup>, der in diesem Projekt genutzten Baustrohballen beträgt der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit in Halmrichtung  $\lambda = 0,080 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  und quer zur Halmrichtung  $\lambda = 0,052 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Die Baustrohballen erreichen die Baustoffklasse B2 nach DIN 4102. Damit gelten sie als normalentflammbar. Die trocken einzubauenden Baustrohballen besitzen eine Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl von  $\mu = 2$ , die im Glaser-Nachweis berücksichtigt werden muss. Für die angrenzenden Holzbauteile muss eine Einbaufeuchte  $\leq 20$  Masse-% eingehalten werden. Außenbauteile, die der Witterung ausgesetzt sind, müssen zusätzlich mit einer außenseitigen Dämmplatte geschützt werden. Dies kann mit einer Holzfaserplatte nach DIN 13171 geschehen. Der Wärmedurchgangswiderstand der Holzfaserplatte muss  $R \geq 0,4 \text{ (m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$  betragen und einen  $s_d$ -Wert  $\leq 0,1 \text{ m}$  aufweisen. Raumseitig muss zum Schutz der Wandkonstruktion eine Dampfbremse aufgebracht werden, die dauerhaft fugendicht ausgeführt wird und einen  $s_d$ -Wert  $\leq 2,0 \text{ m}$  besitzt. Kommt eine Dampfbremse mit feuchtevariablen Diffusionswiderstand zur Ausführung, dann muss unter winterlichen Bedingungen der  $s_d$ -Wert  $\leq 2,0 \text{ m}$  und unter sommerlichen Bedingungen  $s_d$ -Wert  $\leq 0,1 \text{ m}$  betragen. Bei der Verarbeitung im Gefach müssen die Strohballen dichtgestoßen und setzungssicher eingebaut werden, um die Entstehung von Wärmebrücken bzw. Dämmlöcken auszuschließen. Nach Bauregelliste C müssen die Strohballen regelmäßig in einem Abstand von maximal 1,0 m unterstützt werden. Die Baustrohballen dürfen keine statische Funktion übernehmen und folglich nicht druckbelastet werden.

38 vgl. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-1595; Fachverband Strohballenbau Deutschland e. V.

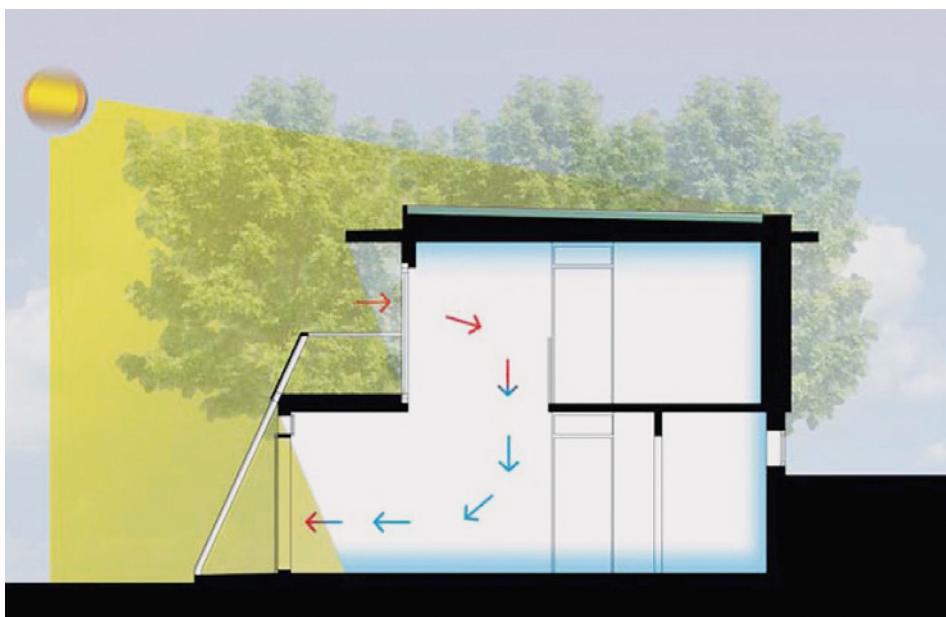
**Abb. 91:** Ansicht Casa Vallgorguina nach der Fertigstellung 2008



**Abb. 92:** Simulationen zur Entwicklung der Temperaturen über zwei Tage im Januar (links) und August (rechts). Jeweils hellblau die Außentemperatur, dunkelblau die Innentemperatur der Luft und rot die raumseitige Temperatur der Wandoberfläche.



**Abb. 93:** Grundriss der Wohnebene im Obergeschoß mit ca. 40 cm starken Außenwänden.



**Abb. 94:** Temperaturschichtung und kühlende Effekte durch Masse im Dachbereich und zu den erdberührten Bauteilen im Gebäude und Luftströmung unter sommerlichen Bedingungen zum 21. Juni.

## 6 Maßnahmen im sommerlichen Wärmeschutz

Die Energieeinsparverordnung fordert nicht nur einzuhaltende Dämmqualitäten für den winterlichen Wärmeschutz, sondern stellt ebenso einzuhaltende Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz bei Gebäuden. Grundlage der Energieeinsparverordnung bilden die Vorgaben zur Bilanzierung aus der DIN 4108-2.<sup>39</sup>

Diese Entwicklung steht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem seit Jahrzehnten anhaltenden Trend, der weg von der tragenden Wand mit Lochfassade und hin zu großflächigen Verglasungen und nichttragenden Außenwänden geht. Mit dieser Entwicklung verbesserten sich die Belichtungsverhältnisse im Innenraum. Natürliches Tageslicht konnte somit effizienter in die Planungskonzepte eingebunden werden. Allerdings erkauft man sich die bessere Belichtung mit einer Erhöhung der Wärmelasten, die von außen in die Gebäude eingetragen werden. Was in den Wintermonaten mit den relativ tiefen Sonnenständen auf der Nordhalbkugel zu einem positiven Nebeneffekt, dem zusätzlichen Wärmeeintrag in den Räumen, führt, kehrt sich in den Sommermonaten um. Starke und lange anhaltende direkte Sonneneinstrahlung auf großflächig verglaste Gebäude führen regelmäßig zu Innenraumverhältnissen mit hohen Innentemperaturen, die die Behaglichkeit einschränken, die Leistung von Mitarbeitern reduzieren und natürlich den Energieaufwand zur Sicherstellung der Aufenthaltsqualität durch aktive Kühlmaßnahmen erhöhen.

Bevor jedoch zusätzliche Schutzmaßnahmen zur Sicherung des sommerlichen Wärmeschutzes eingeplant werden, muss der Einfluss von Fensterflächen zur Raumgröße, deren Ausrichtung und die Eigenschaften von Sonnenstrahlen betrachtet werden, wenn sie in den Raum gelangen. Umgangssprachlich ist der Treibhauseffekt ein bekannter Begriff. Er umschreibt den Vorgang, dass Sonnenstrahlen auf Glasflächen treffen und im

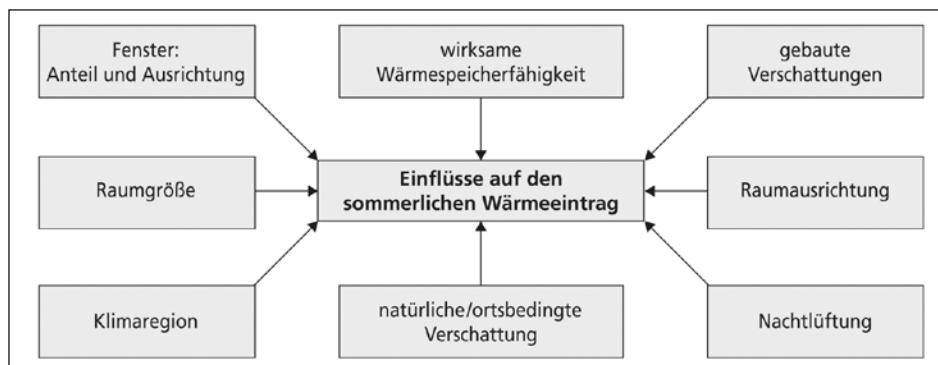


Abb. 95: Einflüsse auf den sommerlichen Wärmeeintrag in einem Gebäude bzw. in einem Raum

39 vgl. DIN 4108-2:2013-02 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz



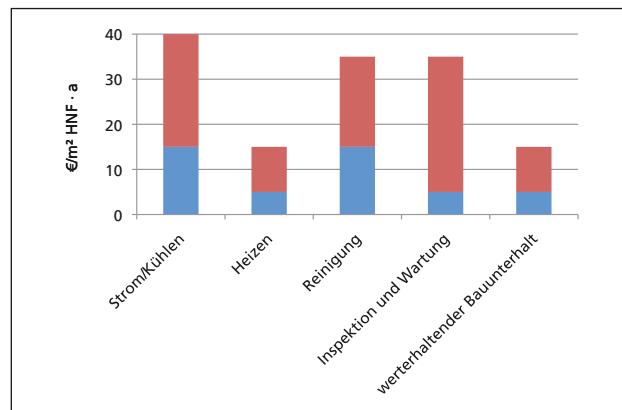
**Abb. 96:** Klimaanlagen (Splitgeräte) in China  
(Quelle: Yanbin Xiao)

Innenraum die Temperatur der Raumluft steigt. Dieser Umwandlungsprozess von auf-treffender Strahlung in Wärme(-strahlung) wird bekanntermaßen bewusst zur Aufzucht von Pflanzen und zur Optimierung der klimatischen Verhältnisse in nördlichen Breiten genutzt. Was der Pflanzenzucht zum Vorteil ist, wird für den Menschen zum Nachteil. Hohe Wärmelasten stören das individuelle Behaglichkeitsgefühl, dem enge Grenzen gesetzt sind und die Leistungsfähigkeit von Menschen senken.

Mit den Maßnahmen zum winterlichen Wärmeschutz, also das was im üblichen Sprachgebrauch als der »normale« Wärmeschutz verstanden wird, soll verhindert werden, dass die erzeugte Raumwärme durch die Gebäudeaußenhülle entweichen kann und der Raum wieder abköhlt bzw. permanent geheizt werden muss.

Das grundsätzliche Ziel von sommerlichen Wärmeschutzmaßnahmen ist hingegen genau umgekehrt. Das heißt, ein zu starkes Aufheizen von Gebäuden oder Räumen in der heißen Jahreszeit oder in heißen Regionen soll verhindert werden. Somit soll auch bei sehr hohen Außentemperaturen ein angenehmes und vor allem erträgliches Innenklima gewährleistet werden. Um insbesondere in heißen Regionen und an warmen Tagen ein erträglich kühles Klima zu schaffen, müssen sommerlichere Wärmeschutzmaßnahmen in der Planung Eingang finden. Hierfür können technische und nicht-technische Möglichkeiten genutzt werden. Am häufigsten kommen in Gebäuden immer noch Klimaanlagen zum Einsatz, welche die Innenluft unter Zuhilfenahme eines erheblichen Energieaufwands kühlen. In Abbildung 96 ist ein solches Negativbeispiel zu sehen. Dort wird über einzelne Systeme eine dezentrale Kühlung durchgeführt. Dabei werden nicht einmal die Synergieeffekte einer zentralen Anlage genutzt.

**Abb. 97:** Betriebskosten im Vergleich, dargestellt sind die Minimal- und Maximalwerte (Quelle: BMVB)



Da die Kosten für die Gebäudekühlung bei weitem die Kosten für das Aufheizen übersteigen, nehmen diese enormen Einfluss auf die Betriebskosten (siehe Abbildung 97). Können die Maßnahmen zur Kühlung jedoch anderweitig, durch passive Maßnahmen, kompensiert werden, besteht ein hohes Einsparpotenzial.

Ein guter und außenliegender Sonnenschutz ist die notwendige Bedingung für eine energieeffiziente Anwendung einer Lüftungs- und Klimaanlage zur Regulierung der Gebäudeinnentemperatur. Wenn jedoch so hohe Außentemperaturen vorliegen, dass ein permanentes Aufheizen des Gebäudeinneren unvermeidlich ist, müssen weiterführende Maßnahmen ergriffen werden, um die Innentemperatur wieder erträglich zu machen. Jedoch sollte dafür so wenig Hilfsenergie wie nur möglich verwendet werden. Um einem energieeffizienten Einsatz von Klimaanlagen gerecht zu werden, ist eine gründliche Planung der Anlage im Ganzen und im Einklang mit der Gebäudehülle, erforderlich, um individuell angepasste und genau auf das jeweilige Gebäude (unter Berücksichtigung des Standorts) abgestimmte Technik zu verbauen.

Dafür werden durch Brunner et. al. einige Kriterien genannt, die bei einer guten Planung berücksichtigt werden müssen:

- Die Nutzungsdaten und Anforderungen sollten als Grundlage für die Auslegung detailliert erfasst werden.
- Die Luftpunktmengen sollten auf die zu erwartenden Nutzungen ausgelegt und im Betrieb bei variabler Nutzung angepasst werden.
- Es sollte ein gutes und den Bedürfnissen angepasstes Anlagenkonzept gewählt werden.
- Wenn die Luftmenge für die Wärmeabfuhr mit der Lüftung alleine deutlich größer würde, als aus hygienischen Gründen erforderlich ist (Außenluftrate pro Person um 36 m³/h), sollte ein ergänzendes Wassersystem verwendet werden.
- Durch kurze Anbindestrecken der Versorgungsleitungen (Zentralen- und Schachtkonzept) lassen sich Energieverluste reduzieren.
- Mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten in Kanälen und Apparaten (große Querschnitte mit entsprechendem Platzbedarf) und generell strömungsgünstige Formgebung lassen sich geringe Druckverluste realisieren.

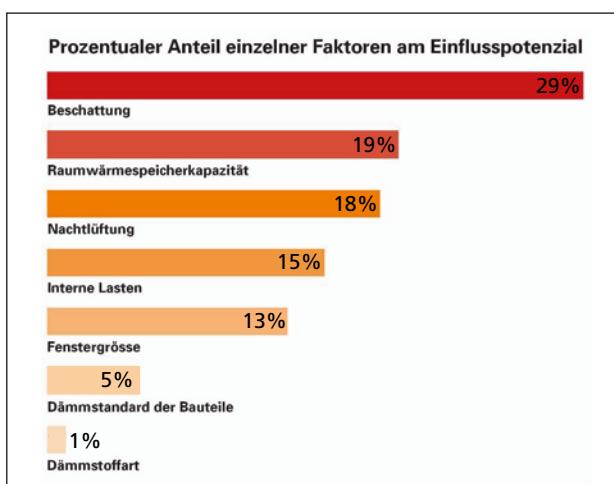
- Es sollten Ventilatoren und Motoren mit hohen Wirkungsgraden in allen Betriebszuständen gewählt werden.
- Es sollte die Möglichkeiten der freien Kühlung und der Nachtlüftung genutzt werden.
- Generell sollten effiziente elektrische Antriebe mit Premium-Motoren (IE35) für Kompressoren, Ventilatoren und Pumpen eingesetzt werden.

Diese hohe Anzahl von Planungsvorgaben und zu beachtenden Richtwerten macht eine gute Planung sehr schwierig und kann den Verbrauch oder Aufwand insbesondere bei großen Gebäuden oder Sonderbauten, welche aufwendige Kühlungskonzepte erfordern, auch nicht komplett reduzieren. Um aufzuzeigen, welche Maßnahmen es gibt und welche schlüssig eingesetzt werden können, um den Sonneneintrag so weit zu verringern, dass nur sehr wenig oder gar keine Kühlenergie erforderlich ist, werden in den nachstehenden Abschnitten die Einflussfaktoren auf die Aufheizung eines Raumes oder eines Gebäudes in der warmen Jahreszeit näher betrachtet.

Die physikalischen Grundlagen sowie Zusammenhänge von Strahlungsanteilen sind in Kapitel 5 für die Materialeigenschaften ausführlich beschrieben, auf diesen physikalischen Grundsätzen beruhen die im Folgenden beschrieben Einflüsse und Auswirkungen auf den sommerlichen Wärmeeintrag in Gebäude und Räume und somit auch auf den sommerlichen Wärmeschutz.

Da jedoch nicht alle Faktoren und Randbedingungen im gleichen Maße Einfluss auf das Raumklima nehmen, müssen planerische Schwerpunkte gesetzt werden, um unter Berücksichtigung der Gegebenheiten und im Rahmen eines optimalen Kosten-Nutzen-Verhältnisses praxisgerechte Lösungen für den Bauherrn zu finden. Für einen pauschalen Anhaltswert kann die nachstehende Tabelle bei der Planung des sommerlichen Wärmeschutzes herangezogen werden.

Zusammenfassend kann über das Portfolio der sommerlichen Wärmeschutzmaßnahmen gesagt werden, dass nicht alle Möglichkeiten auch die gleiche Effektivität bieten. In Abbildung 98 sind die prozentualen Anteile der einzelnen Faktoren am sommerlichen



**Abb. 98:** Prozentualer Anteil der einzelnen Faktoren am Einflusspotenzial für den sommerlichen Wärmeschutz  
(Quelle: Gebäudehülle Schweiz)

Maßnahme	Einflussfaktor	Relevanz	Potenzial für Planer	Potenzial für Nutzer	Grundsätze
Verringerung des solaren Wärmeintrags	Ver-glasungs-anteil	sehr hoch	hoch	–	Glasanteil klein halten, nicht größer wählen als für die Raumnutzung angemessen ist.
	Fenster-ausrichtung	sehr hoch	hoch	–	Horizontale, süd-, ost- und westexponierte Fensterflächen (in dieser Reihenfolge) wirken kritisch auf die sommerliche Innenraumtemperatur.
	Sonnen-schutz	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	Verschattungen außen, niedrige g-Werte für Verglasung. Korrekt bediente und automatische Sonnenschutzvorrichtungen.
	Dämmung der Bauteile	sehr hoch	sehr hoch	–	Je niedriger der U-Wert desto besser.
Erhöhung der Nachtkühlung	Lüftungsart	sehr hoch	hoch	sehr hoch	Querlüftung über Dachfenster- und Fensteröffnungen ist am effizientesten.
	Fenster-geometrie	mittel	hoch	–	Bei gleicher Fensterfläche sind hohe Flügel besser als breite.
Verringerung der internen Wärmelasten	Personen-belegung	mittel	mittel	–	Je weniger Personen im Raum sind, desto günstiger.
	Technische Geräte	hoch	mittel	hoch	Effiziente Geräte halten die internen Lasten niedrig.
Erhöhung der Wärmespeicher-kapazität	Bauteile	hoch	sehr hoch	–	Innen freiliegende massive Bauteile und Zementunterlagsböden erhöhen die Speicherfähigkeit.
	Bauteil-oberflächen	hoch	hoch	–	Ausbau innen mit Materialien mit hoher Wärmespeicher-kapazität (z. B. Gipskartonplatten).
	Einbauart/Verkleidung	mittel	hoch	mittel	Abgehängte Decken, Tep-piche und Akustikmaßnahmen reduzieren (verschlechtern) die Speicherfähigkeit.

**Tab. 20:** Bewertungen der sommerlichen Wärmeschutzmaßnahmen und deren Einflussmöglichkeiten  
(Quelle: Merkblatt Sommerlicher Wärmeschutz)

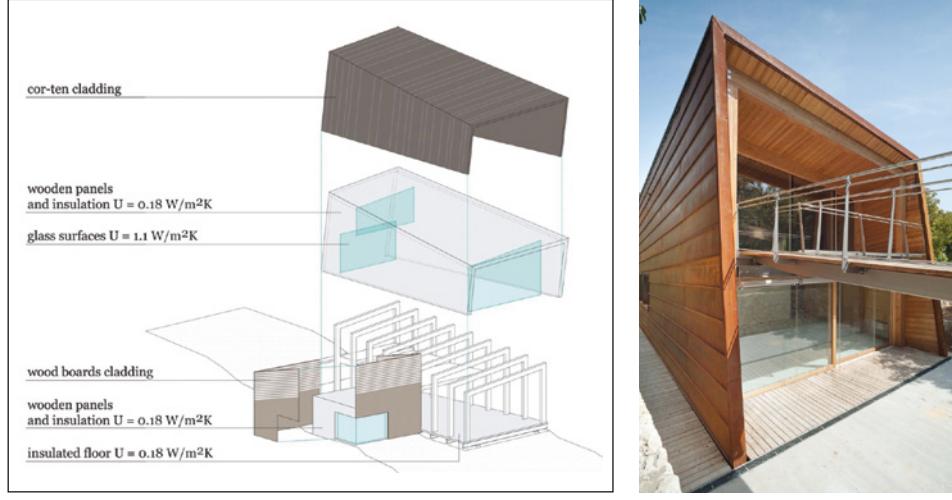
Wärmeschutz aufgelistet. Durch diese Auflistung kann die Möglichkeit von Potenzialen in der Planung besser genutzt werden, da die Ansatzpunkte deutlich definiert werden und somit zielorientiert einer übermäßigen Aufheizung im Gebäudeinneren entgegengewirkt werden kann.

## 6.1 Einflussfaktor Strahlungseintrag

Der entscheidende Einfluss auf die Wärmeentwicklung im Rauminneren ist die eintreffende Sonnenstrahlung. Je höher die äußere, auf das Gebäude einwirkende Belastung durch Wärmestrahlung ist, umso wichtiger sind Schutzmaßnahmen, die den Einfluss der solaren Strahlung und den daraus resultierenden Treibhauseffekt reduzieren.

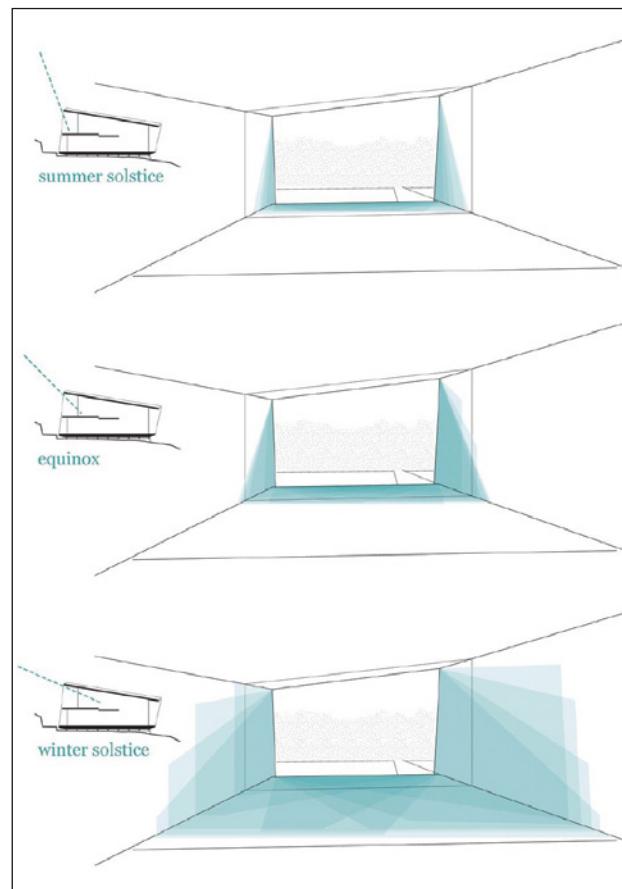
Tatsächlich bestehen hinsichtlich der Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz und dem zu berücksichtigenden konstruktiven Aufwand gute Möglichkeiten, bereits in der Entwurfsphase wesentliche Grundlagen einzuplanen. Der Entwurf des italienischen Architekten Studio Traverso-Vighy aus Vicenza/Costabissara zeigt, wie ein Dachüberstand unter Berücksichtigung der Sonnenstände zur Winter- und Sommersonnenwende auszubilden ist bzw. welche konstruktiven Maßnahmen und Belichtungssysteme daraus abzuleiten sind. Das aus vorgefertigten Elementen konstruierte Wohngebäude wurde 2012 errichtet. Während der Projektlaufzeit und der ersten Betriebszeit erfolgte eine Zusammenarbeit mit der Università di Padova, Dipartimento di Fisica Tecnica, die auch das Monitoring betreute.

Das tvzeb-Gebäude in Vicenza/Italien ist ein experimentelles Null-Energie-Gebäude, das in einer Kooperation der Architekten Traverso-Vighy und der Universität von Padua, Department Technische Physik entstand.



**Abb. 99:** Das tvzeb-Gebäude in Vicenza/Italien. Ansicht der Südfassade vor dem offenen Innenbereich im Untergeschoß mit einem zusätzlichen außenliegenden Sonnenschutz

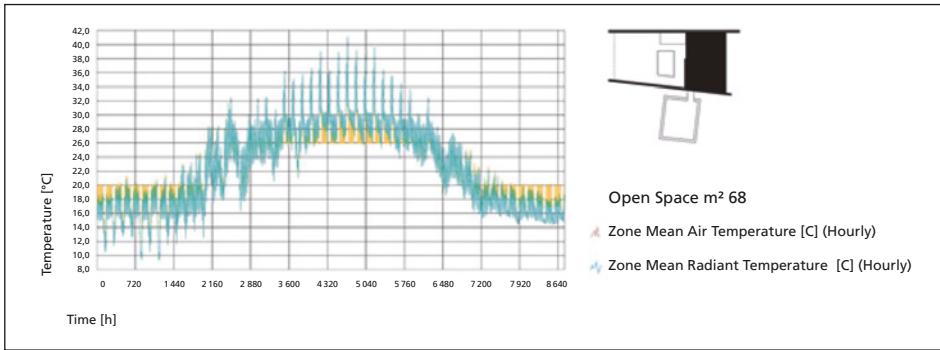
**Abb. 100:** Simulationen zum Einfluss der direkten Sonnenbestrahlung auf die Ausleuchtung des Innenraums unter jahreszeitlicher Veränderung



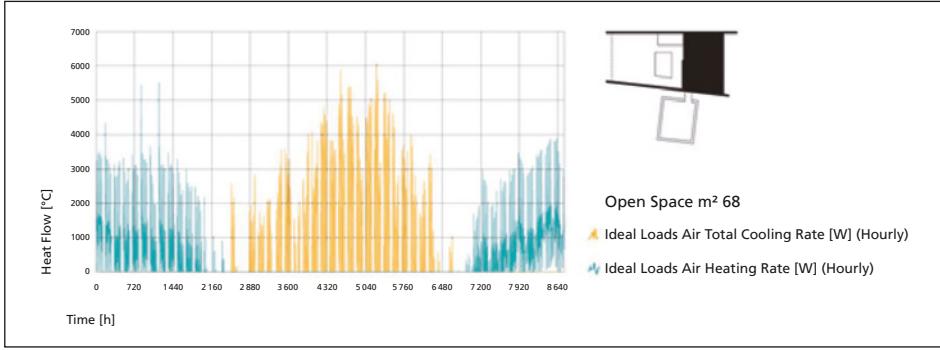
Maßgebend waren hier besonders die sommerlichen Bedingungen, die geprägt sind von einem hohen Sonnenstand, lang anhaltenden Bestrahlungen und starken Energieeinträgen. Unter sommerlichen Bedingungen betrachtet sicherlich eine optimale Lösung. Unter winterlichen Bedingungen gelten jedoch umgekehrte Bedingungen. Die tiefststehende Wintersonne kann weit in das Gebäude eindringen und somit die Bauteilloberflächen erwärmen. Allerdings gilt dieser Zustand nur für klare Wintertage, die noch über eine starke Sonnenbestrahlung verfügen. An Tagen ohne direkte Bestrahlung und aufgrund eines starken Bewölkungsgrades mit einem hohen Anteil an diffusem Licht, kehren sich die Beleuchtungsbedingungen um. Unter diesen Bedingungen fehlt in den Räumen die notwendige Lichtstärke. Damit wird ein zusätzlicher Lichtbedarf und Energieaufwand notwendig.

Die Untersuchungen des Monitoring der Universität Padua zeigen den Jahresgang der Temperaturen im Innenraum und den Heizwärme- und Kühlenergiebedarf.

Insgesamt planten die Architekten Traverso-Vighy ein Gebäude, das über die Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes hinausgeht und ganzheitlich ausgelegt wurde, um die Anforderungen an die EU-Richtlinie 2010/31/EU zur Gebäudeeffizienz zu



**Abb. 101:** Jahresgang der offenen Raumzone der Raumlufttemperatur (gelb) und der RADIANT Temperatur



**Abb. 102:** Jahresgang des Heizwärmebedarfs (blau) und des Kühlenergiebedarfs (gelb), dargestellt über ca. 8640 Stunden

erfüllen. Dabei wurde Photovoltaik, Wärmepumpe, Holzofen, natürliche Ventilation und Nutzung von Regenwasser in das gesamte Gebäudekonzept eingebunden und umgesetzt.

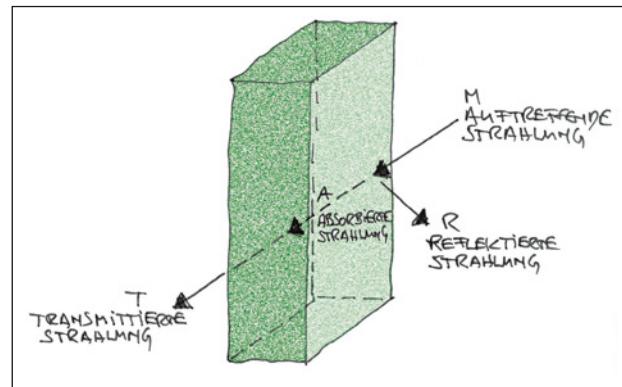
### 6.1.1 Strahlungsverhalten von Glasflächen

Die Strahlung besteht aus der Emission, der Reflexion und der Transmission von langwelliger Infrarot-Strahlung, die von den Objekten abgegeben wird (siehe Abbildung 103).

Die Anteile der aufgenommenen und reflektierten Strahlung hängen von den jeweiligen Stoffkenngrößen des Körpers und von der Wellenlänge der Strahlung ab [11]. Für die Untersuchung von Gebäudeaußenhüllen werden häufig Wärmebildkameras eingesetzt. Um die Wellenlänge zu definieren, ist der kleine, für die Bauwerksthermografie interessante, Infrarot-Strahlungsbereich (siehe Abbildung 104) von 0,78 µm bis 20 µm festgelegt. Für die Energiebilanzierung gilt dann:

$$M = A + R + T$$

**Abb. 103:** Emission, Reflexion und Transmission  
(Quelle: [11], S. 15)



Dabei ist:

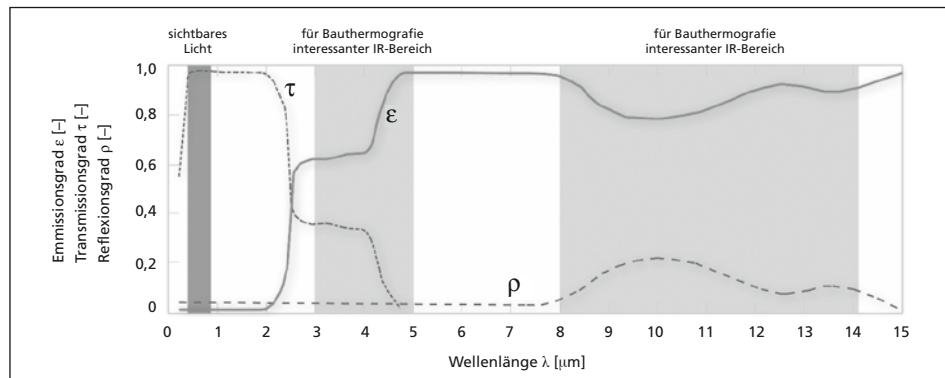
- M Auftreffende Strahlung [ $\text{W/m}^2$ ]
- A Absorbierte Strahlung [ $\text{W/m}^2$ ]
- R Reflektierte Strahlung [ $\text{W/m}^2$ ]
- T Transmittierte Strahlung [ $\text{W/m}^2$ ]

Um die Bilanzierung der auftreffenden bzw. einfallenden Strahlung zu 1,0 zu setzen, wird die Gleichung und somit jeder Strahlungsanteil auf der rechten Gleichungsseite, durch die gesamtauftreffende Strahlung geteilt. Durch die Verteilung der Anteile auf die Strahlungsarten entsteht eine Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$ .

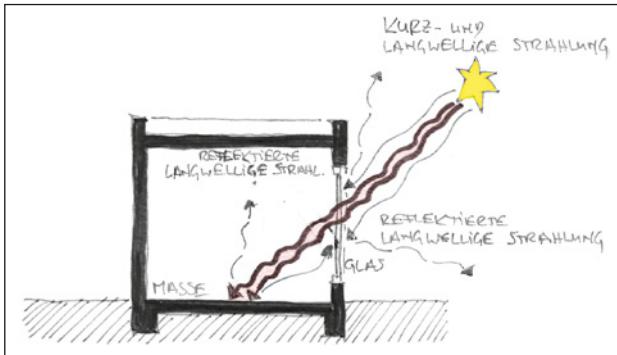
$$1 = \alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda)$$

Dabei ist:

- $\alpha(\lambda)$  Absorptionsgrad in Abhängigkeit der Wellenlänge [-]
- $\rho(\lambda)$  Reflexionsgrad in Abhängigkeit der Wellenlänge [-]
- $\tau(\lambda)$  Transmissionsgrad des Körpers in Abhängigkeit der Wellenlänge [-]



**Abb. 104:** Strahlung von Glas in Abhängigkeit der Wellenlänge (Quelle: [11], S. 27)



**Abb. 105:** Entstehung des Treibhauseffekts durch den infraroten Anteil der Strahlung, die die Glasscheibe durchtritt, während der langwellige Anteil der Strahlung reflektiert wird.

Im Gegensatz zu anderen Materialien hat Glas die besondere Eigenschaft, für langwellige infrarote Strahlung nicht durchlässig zu sein. Die allgemein verbreitete Annahme, dass alle Strahlungen durch Glas durchkommen, stimmt folglich nicht. Somit ist der Transmissionsgrad für die langwellige Strahlung, im Gegensatz zu kurzwelliger infraroter Strahlung (dem sichtbaren Licht), gleich Null.

Diese besondere Glaseigenschaft ist für das als Treibhauseffekt bekannte Phänomen in geschlossenen Gebäuden verantwortlich. Durch die Glasfläche in der Gebäudeaußenhülle wird kurzwellige Sonneneinstrahlung transmittiert. Im Gebäudeinneren trifft diese auf Oberflächen, die keine kurzwellige Strahlung mehr durchlassen.

Dadurch wird ein geringer Teil absorbiert, aber der größte Teil wird in Form von langwelliger Wärmestrahlung reflektiert. Die entstandene langwellige Wärmestrahlung im Gebäudeinneren kann folglich nicht mehr durch die Glasflächen nach außen gelangen und verbleibt im Gebäude. Dieser Effekt wird weiter gesteigert, solange kurzwellige infrarote Strahlung auf die Verglasung trifft und in den dahinterliegenden Raum eindringen kann. Dadurch entsteht ein Wärmestau, der dazu führt, dass Maßnahmen für den sommerlichen Wärmeschutz erforderlich sind und so dem Treibhauseffekt entgegenwirken.

Dieses Aufheizphänomen kann zum einen über zusätzlich angebrachte Schutzmaßnahmen, welche die Strahlung vom Gebäudeinneren oder direkt von der Verglasung fernhalten, beeinflusst und vermindert werden. Zum anderen kann aber auch der Energiedurchlassgrad ( $g$ ) der Verglasungselemente, auf die jeweilige Situation angepasst, ausgewählt werden. Der Energiedurchlassgrad ist also ein Maß für die Durchlässigkeit der kurzweligen Infrarotstrahlung durch eine Glasscheibe. Je mehr Strahlung in den Raum transmittieren kann, desto größer ist der Treibhauseffekt und je mehr Strahlung abgehalten wird, desto größer ist der sommerliche Wärmeschutz.

## 6.1.2 Gesamtenergiedurchlassgrad für Verglasungen

Für die Bewertung von Fensterkonstruktionen und deren Eigenschaften hinsichtlich des Strahlungs- und Wärmedurchgangs wird der  $g$ -Wert genutzt. Dieser Wert ist das Produkt aus dem Anteil der durchgelassenen Strahlung, sowie der Wärmeabgabe der hinteren

Scheibe an die Raumluft<sup>40</sup> und die Wirksamkeit des Sonnenschutzes. Nach DIN 4108-2 setzt sich der g-Wert, wie folgt zusammen:

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

Dabei ist:

$g$  Gesamtenergiedurchlass

$F_c$  Abminderungsfaktor für den Sonnenschutz

Zu den Wärmegewinnen aus der direkten Bestrahlung entstehen zusätzlich Wärmeübergänge von der Scheibe an die Raumluft als langwellige Wärme. Diese resultiert aus dem vorher in der Glastafel dissipierten Anteil der Solarstrahlung, der nun zum Teil in Form von langwelliger Wärmestrahlung von der Scheibe in den Raum gelangt. Da jedoch die meisten Verschattungsanlagen weder dichtschließend noch eng anliegend ausgeführt werden, entsteht ein weiterer Wärmeübergang von der warmen Außenluft auf die Außenseite der Verglasung.

Somit ist herstellerseitig der Nennwert  $g$  anzugeben, um den Gesamtenergiedurchlassgrad einer Verglasung nach DIN EN 1279-5 zu deklarieren. Darüber hinaus ist der Nennwert  $\tau_v$  vom Hersteller für den Lichttransmissionsgrad nach DIN EN 1279-5 zu benennen.

Der relevante Bemessungswert des Gesamtenergiedurchlassgrades  $g_{\text{BW}}$  einer Verglasung entspricht hierbei dem Nennwert  $g$  und der Bemessungswert des Lichttransmissionsgrades  $\tau_{v,BW}$  entspricht dem Nennwert  $\tau_v$ .

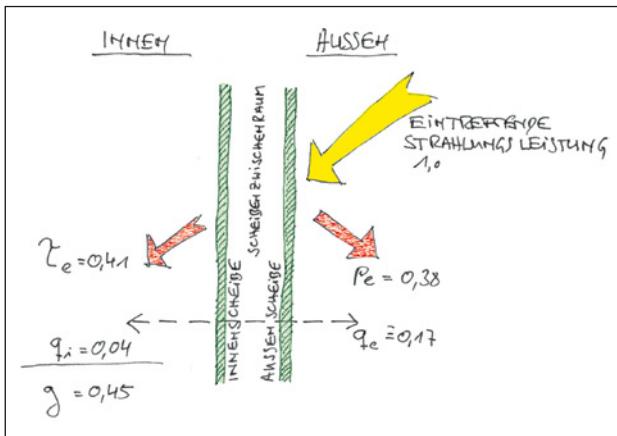
Für die planerische Bewertung oder zur Ermittlung der energetischen Gebäudequalität nach einschlägigen Regelwerken können pauschale Werte herangezogen werden. Liegt ein Nachweis oder eine exakte Herstellerangabe vor, ist diese zu verwenden. Bei Bestandsgebäuden ist dies jedoch oft schwierig, sodass die pauschalen Anhaltswerte eine gute Näherung ergeben.

Somit folgen zur Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrads einer Verglasung prinzipiell drei verschiedene Möglichkeiten:

- Vereinfachte Berechnung über  $g_{\text{tot}} = g \cdot F_c$  mit genauer Bestimmung von  $g$  (Verwendung von Herstellerangaben)
- Vereinfachte Berechnung über  $g_{\text{tot}} = g \cdot F_c$  mit einem Anhaltswert für  $g$  in Abhängigkeit des Glastyps und des U-Werts der Verglasung
- Direkte Berechnung von  $g_{\text{tot}}$  inklusive der Auswirkungen von Sonnenschutzvorrichtungen (über DIN V 4108-6, Anhang B)

Die Grundlagen zur Berechnung des Gesamtenergiedurchlassgrads einer Verglasung sind in DIN EN 410:2011-04 (»Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen«) niedergeschrieben. Der Gesamtenergiedurchlassgrad  $g$  wird nach der nachstehenden Gleichung als die Summe

40 vgl. [40], S. 22



**Abb. 106:** Beispielhafte Darstellung der Aufteilung einer Strahlungsleistung an Verglasungen

des direkten Strahlungstransmissionsgrads  $\tau_e$  und des sekundären Wärmeabgabegrads  $q_i$  der Verglasung nach innen definiert.<sup>41</sup>

$$g = \tau_e + q_i$$

Wie bereits in im vorangegangenen Abschnitt, erläutert setzt sich die einfallende Strahlung aus mehreren Teilen zusammen und kann reflektiert, absorbiert oder durchgelassen werden. In Abbildung 106 ist beispielhaft aufgeführt wie die einzelnen Gleichungsanteile in Summe den Gesamtenergiedurchlassgrad als Kennwert für die Verglasungen ergeben.

Die einzelnen Strahlungsteile können über eine direkte Messung an einer realen Verglasung vorgenommen werden oder über Gleichungen nach DIN EN 410 berechnet werden. Auf Grund der Komplexität der Berechnungsansätze sei an dieser Stelle nur auf das normative Berechnungsverfahren hingewiesen ohne es im Detail zu erläutern, da für die praktische Anwendung einer Bewertung die Herstellerangaben und pauschalen Anhaltswerte im Regelfall anzuwenden sind.

Die einfachste Möglichkeit zur Bestimmung des Energiedurchlassgrades ist die pauschalierte Festlegung über die Konstruktionsmerkmale eines Fensters bzw. einer Verglasung nach DIN 4108-4:2013-02. Insbesondere in der Bewertung von Gebäudebeständen ist diese Anwendung sehr gebräuchlich, da häufig keine anderen Angaben oder Werte zur Verfügung stehen. Jedoch sollte berücksichtigt werden, dass eine generelle Anwendung der pauschalen Werte, insbesondere bei der Bewertung der energetischen Gebäudequalität nach Energieeinsparverordnung, zu schlechten Ergebnissen führt.

Um einen effektiven Schutz vor dem Treibhauseffekt und der dabei verbundenen Temperatursteigerung im Rauminneren zu erreichen, bietet sich eine Sonnenschutzverglasung mit einem geringen  $g$ -Wert an. Der Sonnenschutz bzw. die Reduzierung der eingetragenen Strahlungsenergie wird über eine Beschichtung oder eine Beimischung von feinen metallischen Partikel während der Glasherstellung erreicht.

41 vgl. DIN EN 410:2011-04, S.12

**Tab. 21:** Anhaltswert für den Gesamtenergiedurchlassgrad in Abhängigkeit von der Konstruktion, des U-Wertes sowie des Glastypen (Quelle: DIN 4108-4:2013-02, S. 31, Tabelle 11)

Konstruktionsmerkmale der Glastypen	$U_g$ [W(m <sup>2</sup> · K)]	$g_{\perp}$
Einfachglas	5,8	0,87
Zweifachglas mit Luftfüllung, ohne Beschichtung	2,9	0,78
Dreifachglas mit Luftfüllung, ohne Beschichtung	2,0	0,70
Wärmedämmglas zweifach mit Argonfüllung, eine Beschichtung	1,7	0,72
	1,4	0,67
	1,2	0,65
	1,1	0,60
Wärmedämmglas dreifach mit Argonfüllung, zwei Beschichtungen	0,8	0,60
	0,7	0,50
Sonnenschutzglas zweifach, mit Argonfüllung, eine Beschichtung	1,3	0,48
	1,2	0,37
	1,2	0,25
	1,1	0,36
	1,1	0,27
Sonnenschutzglas dreifach, mit Argonfüllung, zwei Beschichtungen	0,7	0,24
	0,7	0,34

**Abb. 107:** Glasfärbungen bei unterschiedlich starker Sonnenschutzverglasung mit einem niedrigen  $g$ -Wert



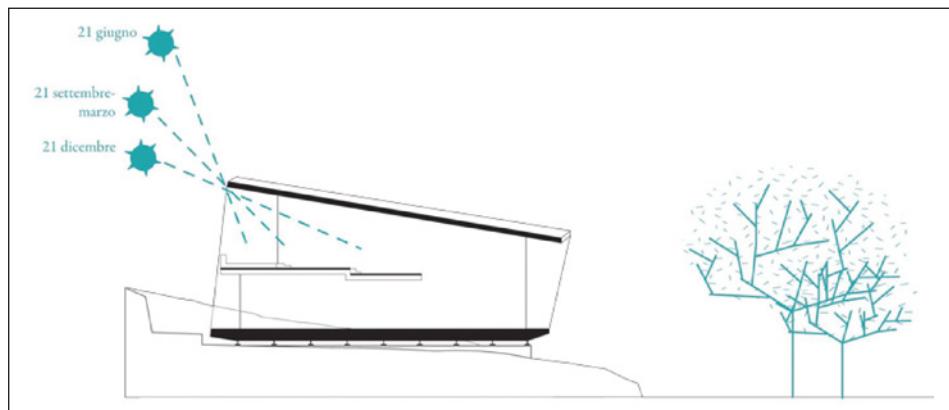
## 6.2 Einflussfaktoren auf die Wärmeentwicklung im Raum

Die Wärmeentwicklung in Räumen ist maßgebend geprägt von der Strahlung, die durch die Fensterflächen in den Raum gelangen kann, sowie dem Verhältnis von Fensterfläche zu Raumgröße und den Materialeigenschaften der umgebenden Bauteile. Die bedeutendste Schutzmaßnahme zur Sicherstellung behaglicher Innenraumtemperaturen ist dabei der außenliegende Sonnenschutz, der bereits das Auftreffen der solaren Strahlung auf die Glastafeln verhindert.

Ergänzend zu dem außenliegenden Sonnenschutz kann bereits in der Entwurfsphase mit weiteren konstruktiven Maßnahmen, wie tiefliegende Fenster oder Dachüberstände die Bedingungen für den sommerlichen Wärmeschutz verbessert werden. Der Entwurf des italienischen Architektenteams Traverso-Vighy zeigt, wie dies möglich ist. Die Festlegungen zur Ausbildung des Dachüberstandes wurden auf der Grundlage der auf den Ort bezogenen Sonnenstände getroffen. Maßgebend waren in diesem Verfahren besonders die sommerlichen Sonnenstände, die geprägt sind von langen Bestrahlungszeiten und hohen Energieeinträgen. Unter Berücksichtigung der sommerlichen Bedingungen kam ein Dachüberstand zur Ausführung, der im Sommer eine volle Verschattung gewährleistet und damit den Energieeintrag in das Gebäude gering hält.

Unter den Bedingungen der Übergangsjahreszeiten und im Winter entschied man sich mit dem Entwurf dafür, dass Sonneneinträge gewünscht und Energieeinträge gewollt sind. Der tiefstehenden Wintersonne wurde keine Barriere entgegen gestellt. Die Wintersonne kann weit in das Gebäude eindringen und damit die beschienenen Bauteiloberflächen erwärmen.

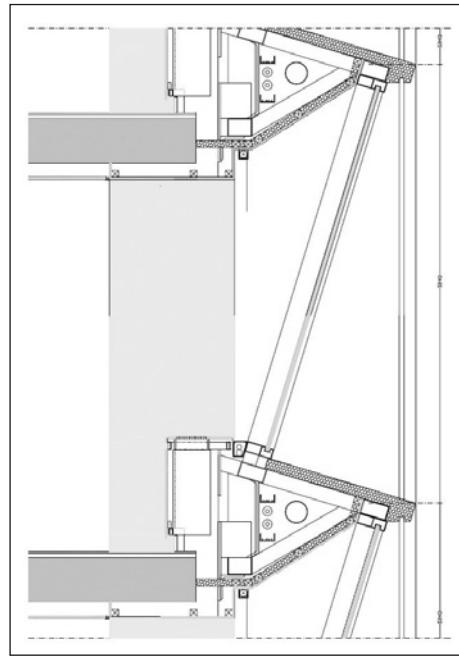
Allerdings können diese Energiegewinne nur für klare Wintertage berücksichtigt werden, wenn die Sonnenbestrahlung direkt ist. An bewölkten Tagen mit einem hohen Anteil an diffusem Licht sind keine Energiegewinne möglich, da die direkte Bestrahlung ausbleibt. An diesen Tagen können sich die Energiegewinne zu einem erhöhten Energiebedarf umkehren, da dann der weit ausladende Dachüberstand dafür sorgt, dass der



**Abb. 108:** Schnitzzeichnung der Sonnenstandssimulation für das Wohn- und Bürogebäude (Quelle: Traverso-Vighy)

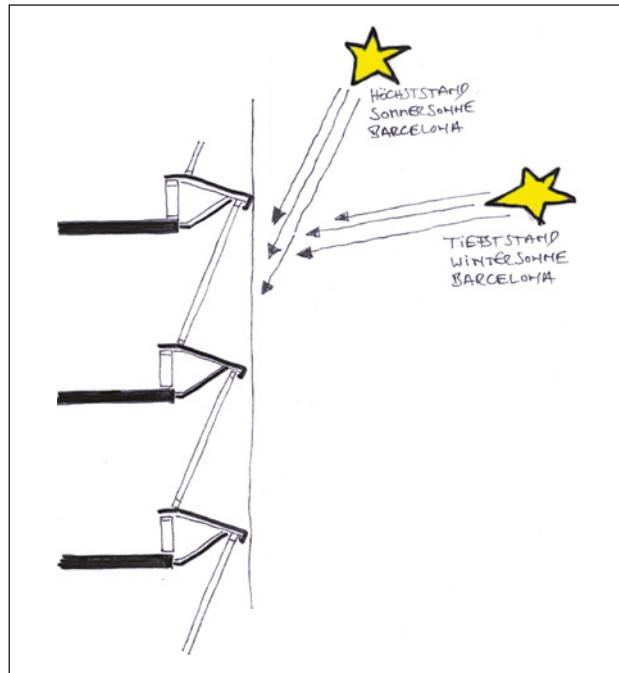


**Abb. 109:** Hochhaus an der Avenida Diagonal in Barcelona (TAC Arquitectes, Barcelona)



**Abb. 110:** Detailschnitt der geneigten Fensterkonstruktion mit der blechverkleideten Brüstung

**Abb. 111:** Die Sommer- und Wintersonnenstände von Barcelona bezogen auf die Fassade des Hochhauses an der Avenida Diagonal in Bezug zur Schräglagestellung der südorientierten Glastafeln.



Energiebedarf für Beleuchtung ansteigt, weil weniger Licht in die Tiefe des Raumes gelangt.

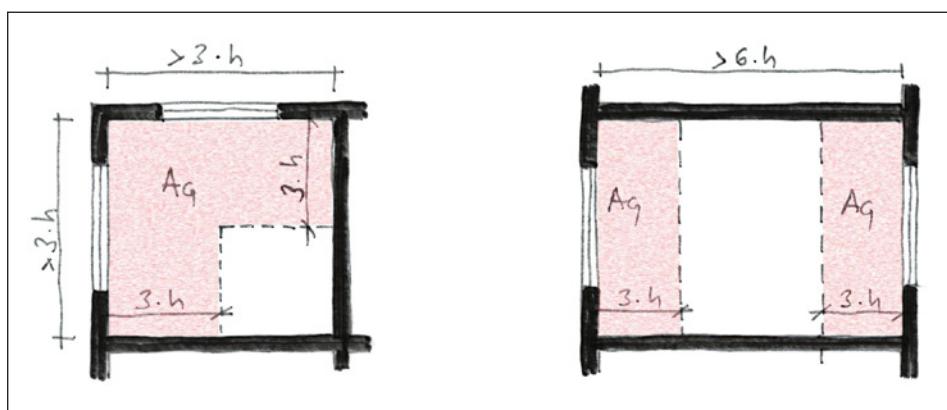
Auf eine andere Weise beeinflussten die Sonnenstände die Planung zur Sanierung eines Bürohochhauses in Barcelona von TAC Arquitectes. Die Glastafeln der zum Süden orientierten Fassade wurden mit einer Neigung ausgeführt, die zum Höchststand der Sommersonne keine direkte Bestrahlung in die Räume zulässt.

Das in Abbildung 109 dargestellte Hochhaus an der Avenida Diagonal in Barcelona besitzt einen innenliegenden Sonnenschutz und nutzt für den Schutz der Erwärmung der Räume hinter der Glasfassade die Eigenverschattung durch die auskragende Deckenplatte bei Sonnenhöchstständen. Durch die geneigte Fensterkonstruktion kann weniger direkte Sonnenstrahlung während der Sonnenhöchststände eingetragen werden. Jedoch sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass bei dieser Konstruktionsart, der Wartungs- und Instandhaltungsaufwand erheblich ansteigt.

### 6.2.1 Raumgröße (Nettogrundfläche)

Je größer ein Raum ist, desto langsamer findet eine Aufheizung statt, da mehr eintreffende Strahlung benötigt wird, um einen Effekt in dem Raumluftvolumen zu spüren. Bei den Raumflächen ist ebenfalls zu beachten, dass einfallende Strahlung immer in einem Winkel zur standardmäßig vertikal eingebauten Fensterverglasung eintrifft. Somit ist nie die volle Raumfläche von der direkten Sonneneinstrahlung betroffen.

Die anzusetzende Nettogrundfläche eines Raumes errechnet sich in der Regel aus den lichten Abmessungen und entspricht somit der Raumgröße. Sollen jedoch besonders tiefe Räume, wie Sporthallen, Aulen oder ähnliches bewertet werden, müssen die Raumabmessungen in Abhängigkeit zur lichten Raumhöhe begrenzt werden. Die anzusetzende Tiefe, gemessen von jeder Wand mit Fenstern oder anderweitig solarwirksamen Flächenanteilen, darf das Dreifache der lichten Raumhöhe dabei nicht überschreiten. Für den Fall von zwei gegenüberliegenden Fassaden müssen somit für einen Raum ggf. zwei Nachweise für den sommerlichen Wärmeschutz geführt werden. Der Raum teilt sich somit in



**Abb. 112:** Berechnung der anzusetzenden Raumflächen bei Begrenzung der Raumtiefe für den sommerlichen Wärmeschutznachweis

zwei Nutzungsbereiche, die insbesondere bei direkter Sonneneinstrahlung lokal unterschiedliche Temperaturen aufweisen können.

### 6.2.2 Raumverhältnis und Fenstergrößen (Fensteranteil)

Folgt man dem normativen Nachweisverfahren zum sommerlichen Wärmeschutz, stellt sich zuerst die Frage, unter welchen Bedingungen der Nachweis für Neubauten zu führen ist. Nach DIN 4108-2 besteht die Nachweispflicht nicht grundsätzlich, wenn die vorgegebenen Schwellenwerte unterschritten werden. Diese sind in Abhängigkeit zur Ausrichtung von Fassaden oder Dachflächen zu sehen. Im normativen Verfahren entfällt der Nachweis, wenn der grundflächenbezogene Fensterflächenanteil bei nordorientierten Fassadenflächen nicht größer als 15 % ist. Sind die Fassadenflächen von Ost über Süd nach West orientiert, darf der Fensterflächenanteil nur 10 % der Raumfläche betragen. Liegen die Fenster in einer Dachfläche, dann verringert sich der Wert zum nachweisfreien Verfahren auf 7 % zur Raumfläche. Auf den ersten Blick erscheint dies als eine interessante Option für den Planer. Bei genauer Betrachtung wird jedoch schnell offenbar, dass der Planer diese Schwellenwerte bei Aufenthaltsräumen nicht erreichen darf, da dem die zwingend einzuhaltende Anforderung der jeweiligen Landesbauordnung im Wege steht. Hier ist eine grundlegende Anforderung, dass 1/8 der Grundfläche eines Aufenthaltsraums als Fensterfläche vorhanden sind. Folglich ist der Nachweis immer zu erbringen, egal zu welcher Konstruktion der Planer sich entscheidet.

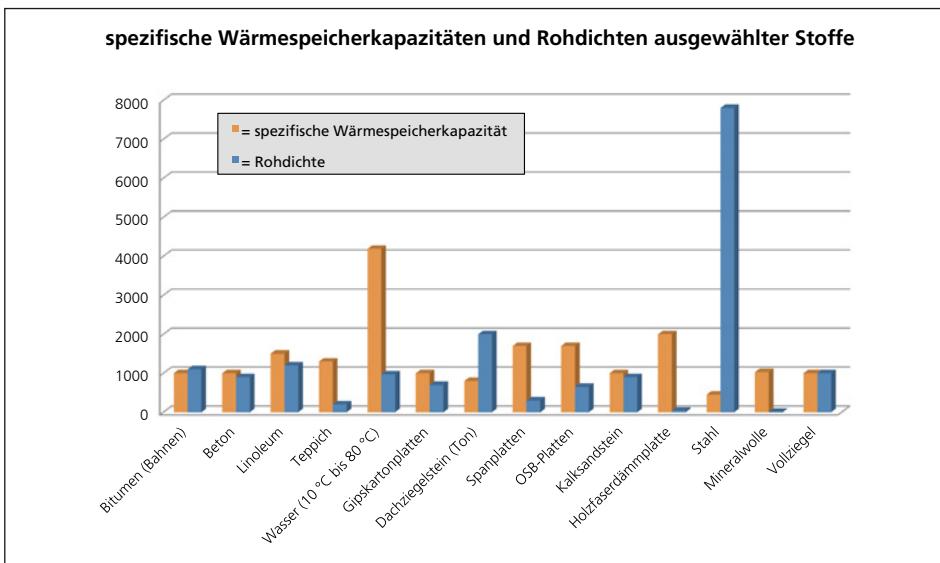
### 6.2.3 Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen

Die Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen, welche sich in den normativen Berechnungsverfahren nach DIN 4108-2 vereinfacht auf den wirksamen Anteil bezieht und daher meist als wirksame Wärmespeicherfähigkeit bezeichnet wird, gibt an, wie ein Bauteil vorhandene Temperaturen speichern kann. Somit ist die Wärmespeicherfähigkeit ein Maß für die Trägheit des Bauteils auf veränderte Temperaturrandbedingungen zu reagieren.

Als Berechnungsgrundlage für betroffene Bauteile gilt die Beziehung zwischen der Zufuhr einer Wärmemenge ( $\Delta Q$ ) und der Temperaturerhöhung ( $\Delta T$ ). Daher definiert sich die Wärmekapazität ( $C$ ) als Differential  $\Delta Q/\Delta T$ . Die spezifische Wärmekapazität ( $c$ ) oder auch als spezifische Wärmespeicherkapazität bezeichnet, bildet eine stoffbezogene Größe und setzt sich aus dem Quotienten der Wärmekapazität und der Masse zusammen. Je größer die spezifische Wärmespeicherkapazität ist, umso höher sind die Energiemengen, die in einem Stoff gespeichert bzw. aufgenommen werden können.

Ein Bauteil mit einer hohen Speicherfähigkeit dient daher als Puffer für etwaige Temperaturschwankungen und gleicht diese durch die Abgabe und Aufnahme von Wärmemengen aus. Einen Überblick der spezifischen Wärmekapazitäten von gängigen Baustoffen liefert die nachstehende Abbildung auf Grundlage der Wertangaben nach Angaben der DIN EN ISO 10456:2010-05.

Für das normative Nachweisverfahren wird vereinfacht eine Einteilung in leichte, mittelschwere und schwere Bauart vorgenommen. Diese Pauschalierung stellte eine grobe Einteilung in verschiedene Klassen dar, welche die erforderliche Schutzmaßnahme für einen übermäßigen Sonnenenergieeintrag beeinflussen.



**Abb. 113:** Spezifische Wärmespeicherfähigkeit und Rohdichten ausgewählter (Bau-)Stoffe im Vergleich

Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit ist das Maß für die Speicherung von Wärmeenergie in Bauteilen. Für die Berechnung nach Norm werden alle Bauteile in die Berechnung miteinbezogen, die zu dem Raumabschluss gehören. Dabei spielt es keine Rolle, ob der Raumabschluss zu einem anderen Raum oder an die Außenluft grenzt. Also alle Wand-, Boden- und Deckenflächen sowie Türen sind in der Berechnung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit einzubeziehen.

Da für das Aufheizen eines Raumes die Speicherfähigkeit nur oberflächennah relevant ist, wird auch nur ein oberflächennaher Anteil der Gesamtkonstruktion in die Berechnung einbezogen. Entweder ist die anzusetzende Schicht von der Innenseite bis zur Dämmeschicht oder bis zu einer Stärke von 10 cm für die wirksame Wärmespeicherfähigkeit relevant. Jedoch kann eine Schicht nur bis zu ihrer wahren Stärke angesetzt werden. Dies ist der Fall bei Schichtdicken die kleiner als 10 cm sind, z. B. Wohnungstüren, schwimmenden Estrichen oder Leichtbauwände.

Jedoch liegt in der heißen Jahreszeit die Außentemperatur über der Innentemperatur und es findet ein Wärmefluss in umgekehrte Richtung statt. Somit findet kein Wärmeverlust über die opaken Bauteile statt sondern ein Wärmeeintrag zum Raum hin. Da der Grundsatz: »warm fließt zu kalt« Bestand hat, muss für den sommerlichen Wärmeschutz zum einen ein Aufheizen der Räume durch die Außentemperatur und zum anderen eine Speicherung und dadurch ein Verbleib von hohen Temperaturen im Raum verhindert werden.

## 6.3 Sommerliche Wärmeschutzmaßnahmen

### 6.3.1 Wirksamkeit von Verschattungsanlagen

Wie unter 6.1 dargestellt, wird der Energiedurchlass einer Fensterkonstruktion als  $g_{\text{total}}$  bezeichnet, der u. a. aus dem Faktor  $F_c$  für den Sonnenschutz gebildet wird. Dieser  $F_c$ -Faktor steht wiederum in Beziehung zur Glasqualität von Zwei- oder Dreifach-Verglasungen. Den effektivsten Schutz vor solarer Bestrahlung bieten die außenliegenden Konstruktionen, die ein direktes Auftreffen der Sonnenstrahlen verhindern. Obwohl auch innenliegende Sonnenschutzvorrichtungen genutzt werden können, ist deren Wirkung deutlich geringer, da die Sonnenstrahlung trotzdem auf die Glasscheibe auftrifft und durchgeht, bzw. von der Scheibe dissipiert wird und als langwellige Wärmestrahlung von der Scheibe aus die Raumluft erwärmt.

Zur Beurteilung der Wirksamkeit von Verschattungsanlagen müssen zwei Faktoren berücksichtigt werden. Dabei ist nicht nur die direkte Bestrahlung, dargestellt mit dem

Art der Sonnenschutzvorrichtung	$F_c$		
	Zweifach-Verglasung $g \leq 0,40$	Zweifach-Verglasung $g > 0,40$	Dreifach-Verglasung $g > 0,40$
Ohne Sonnenschutzvorrichtung	1,00	1,00	1,00
<b>Innenliegend oder zwischen den Scheiben</b>			
Weiße oder hoch reflektierende Oberflächen und geringe Transparenz	0,65	0,65	0,7
Helle Farben und geringe Transparenz	0,75	0,75	0,80
Dunkle Farben oder höhere Transparenz	0,90	0,85	0,90
<b>Außenliegender Sonnenschutz</b>			
Fensterläden, Rollläden zu $\frac{3}{4}$ geschlossen	0,50	0,30	0,30
Fensterläden, Rollläden geschlossen	0,15	0,10	0,10
Jalousie und Raffstore mit $45^\circ$ Lamellen-drehung	0,30	0,25	0,25
Vordächer	0,55	0,5	0,5
Markisen allgemein			
Freistehende Lamellen			

**Tab. 22:** Gegenüberstellung der anzusetzenden Rechenwerte nach DIN 4108-2 zur Bewertung des Sonnenschutzes.



**Abb. 114:** Außenliegender Sonnenschutz – fassadenbündig integriert mit einem  $F_c$ -Wert von 0,10



**Abb. 115:** Gebäude mit einem feststehenden Sonnenschutz aus freistehenden Lamellen mit einem  $F_c$ -Wert von 0,50

Transmissionsgrad, maßgebend, sondern zusätzlich die Wärmestrahlung und Konvektion durch die dissipierte Wärme der Glasscheibe zu betrachten.<sup>42</sup>

$$F_x = g_{\text{tot}} / g$$

Dabei ist:

$g$  Gesamtenergiedurchlass der Verglasung

$g_{\text{tot}}$  Gesamtenergiedurchlass der Verglasung in Kombination zum Sonnenschutz

$F_x$  Abminderungsfaktor für den Sonnenschutz

In der Gesamtheit bei allen Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz, die mittels Einsatz von Markisen oder Jalousien gesichert werden sollen, muss begleitend eine Betrachtung zu einem möglichen Mehraufwand an Beleuchtung, zur Blendfreiheit der Konstruktion und zu den zu erwartenden Oberflächentemperaturen auf der Rauminnenseite der Glasfläche, stattfinden. Zu den raumseitigen Oberflächentemperaturen finden sich modellhafte Hinweise, die einen Fall bei 800 W/m<sup>2</sup> Bestrahlung, bei einer Außentemperatur von 32 °C und Innentemperatur von 26 °C beschreiben.

Nicht nur einzelne Räume können von Verschattungselementen profitieren, sondern auch großflächige Verschattungen wie in Abbildung 116 in der Innenstadt von Malaga sorgen für einen effektiven Sonnenschutz in den angrenzenden Gebäuden und verbessern zugleich das innerstädtische Mikroklima.

### 6.3.2 Einbaulage von Fensterelementen

Für die stetige thermische Optimierung der Gebäudeaußenhüllen rücken bei immer höher gedämmten Wänden und den hohen Anforderungen an Lüftung, Luftfeuchtigkeit und einer behaglichen Rauminnentemperatur die Anschlusspunkte von Einbauelementen, wie beispielsweise Fenstern und Türen, in den Fokus einer energetischen Betrachtung. Hierbei

<sup>42</sup> vgl. DIN EN 14501:2006-02; Abschlüsse-thermischer und visueller Komfort, Leistungsanforderungen und Klassifizierung

**Abb. 116:** Großflächiger Sonnenschutz über einer Einkaufsstraße in der Innenstadt von Malaga, Spanien



muss zwischen einer reinen Zweckerfüllung und erhöhten Komfortanforderungen natürlich unterschieden werden, um jedoch das maximale beste Ergebnis mit vorgegebenen Baumaterialien und Einbauelementen zu erreichen, sollte eine sinnvolle Detailbetrachtung der möglichen Einbausituationen und Bauausführungsvarianten erfolgen.

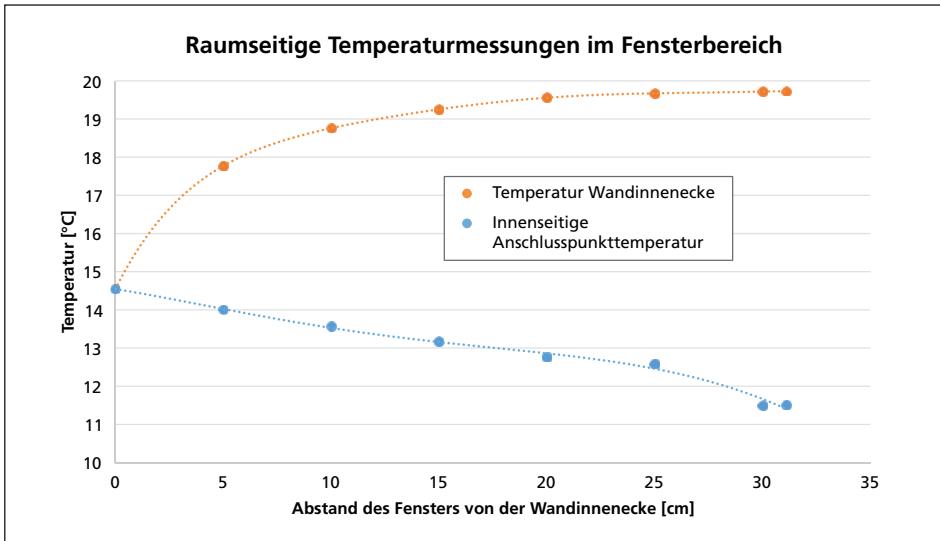
Bei gedämmten Außenfassaden mit einer guten energetischen Qualität sollten Fenster in der Regel in die Dämmebene der Gebäudeaußenhülle eingebaut werden. Dabei müssen natürlich konstruktive und ausführungstechnische Belange berücksichtigt werden.

Zur Verdeutlichung der möglichen Einbausituationen und deren Auswirkungen auf die Oberflächentemperatur in der Anschlusscke, ist von den Autoren eine numerische Untersuchung an einer monolithischen Auswand mit stumpf eingesetztem Holzfenster durchgeführt worden. Für einen umfangreichen Überblick über die Bewertungen und verschiedenen Einbausituationen im Fensteranschlussbereich sind die Wärmebrücken-kataloge Fenstereinbau vom Energieinstitut Vorarlberg<sup>43</sup> zu empfehlen.

Für den hier vorgestellten Referenzfall ist bei einem monolithischen Wandaufbau mit einer relativ geringen Rohdichte und somit guten wärmeschutztechnischen überprüft worden, welche Auswirkungen die Lage des Fenstereinbaus, auf den Wärmefluss in dem Anschlussbereich zwischen Wand und Rahmenprofil besitzt. Hierfür wurde die Lage des Abstandes von der Wandkante im Außenbereich variiert und grafisch über die Temperatur an der Innenecke aufgetragen (Abbildung 117).

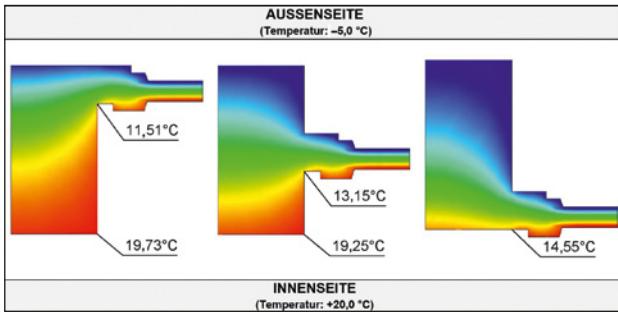
Exemplarisch sind die grafischen Ergebnisse der numerischen Wärmebrücken-Simulationen an drei markanten Punkten in Abbildung 118 dargestellt. Dabei lassen sich deutlich die veränderten Isothermen-Verläufe erkennen. Die Berechnung unterstreicht also deutlich die empfohlene Lage des Fensters in der Außenwand, wonach der kälteste Punkt im Anschlussbereich bei einem flächenbündigen Einbau mit der Außenfassade entsteht. Somit sollten unter Berücksichtigung von Verschattung und Lichteintrag eine Einbausituation gewählt werden, in der das Fensterelement nach innen gerückt ist.

43 nachzulesen in: [www.energieinstitut.at/?sID=4091](http://doi.org/10.51202/9783819705057)



**Abb. 117:** Numerische Untersuchungsergebnisse zur Innentemperatur der Wandecke und des Anschlusspunkts Fensterprofil – Wand

Die Folgerung für den optimalen Einbau des Fensters in die Öffnung einer monolithischen Wand ist, dass Fenster weder außen noch innen bündig zu setzen sind. Mit der Anordnung der Fenster im ersten Drittel von innen aus betrachtet, erreicht man eine deutlich höhere Temperatur der Innenecke und nur wenig Temperatureinbußen in der direkten Anschlussstelle. Diese Betrachtung kann allerdings nur durchgeführt werden, wenn sichergestellt ist, dass die minimale Temperatur im gesamten Bereich oberhalb der kritischen Oberflächentemperatur liegt und so Tauwasserausfall und Schimmelpilzbildung verhindert wird.



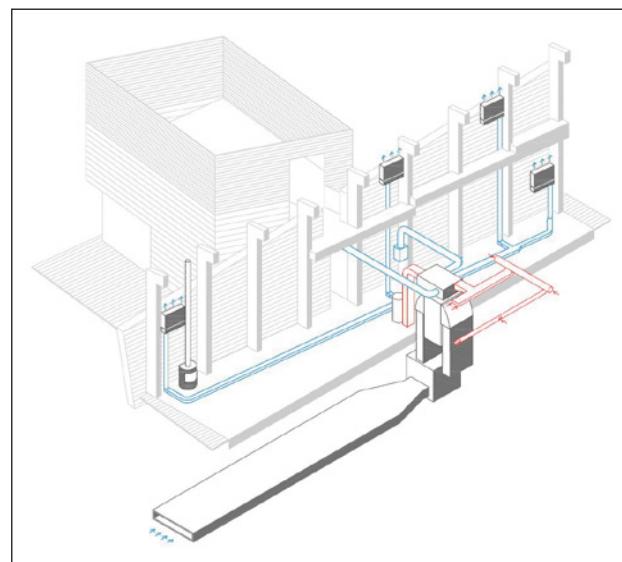
**Abb. 118:** Grafische Auswertung der numerischen Simulation verschiedener Fenstereinbauten

### 6.3.3 Energiearme Gebäudekühlung und natürliche Ventilation

Sowohl in der Erwärmung, wie in der Abkühlung der zugeführten Raumluft werden ähnliche einfache Prinzipien genutzt, um das Temperaturniveau zu beeinflussen. Wie bereits in der solaren Erwärmung von Luft in Kollektoren oder passiven Absorbern beschrieben, besteht die Möglichkeit, die Frischluft-Ansaugung über Kanäle, die im Erdreich verlegt sind, vorzunehmen. Mit dem Durchführen der Frischluft im Sommer durch einen Erdkanal nutzt man die thermische Trägheit des Erdreichs bzw. dessen niedrigeres Temperaturniveau. Die warme Außenluft wird im Ansaugvorgang im Kanal abgekühlt. Bei dieser Art der Vorkühlung muss jedoch berücksichtigt werden, dass in den Sommermonaten mit dem Ausfall von Kondensat gerechnet werden muss. Dadurch, dass die warme Luft im Sommer eine deutlich höhere absolute Feuchte hat, muss die Luft im Zuge der Abkühlung im Erdkanal ihre Feuchtelast zwangsläufig abgeben. Aus diesem Umstand können hygienische Probleme resultieren, da dieses Kondenswasser wiederum die Grundlage für einen Befall mit Schimmelpilz bilden könnte.

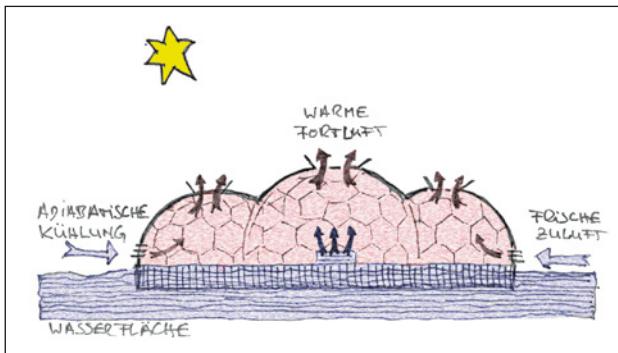
Der Trend der schwimmenden Bauten in den Niederlanden bringt durch die exponierte Lage auf der Wasserfläche neue Möglichkeiten zur Gebäudekühlung. Durch die vollständige und ungehinderte Angriffsfläche für den Wind kann eine natürliche Ventilation zur Gebäudeklimatisierung erzeugt werden. Wie in Abbildung 121 schematisch gezeigt ist, führt der anströmende Wind auf die Gebäudeaußenhülle zu einer thermischen Strömung im Gebäudeinneren. Die kühлere frische Zuluft wird im unteren Fassadenteil (siehe Abbildung 120) in das Gebäude geführt. Die Erwärmung und damit beginnende natürliche Thermik sorgt dafür, dass die warme Luft als Fortluft im Dachbereich entweicht. Dieser natürliche Luftzug erzeugt einen steten Luftwechsel und verhindert stehende Luft im Gebäudeinneren. Damit wird einer Überhitzung im Innenraum entgegengewirkt.

**Abb. 119:** Frischluft-Ansaugen des tvzeb-Gebäudes in Vicenza/Italien erfolgt über eine im Erdreich verlegten Lüftungskanal. Aufgrund der thermischen Trägheit des Erdreiches kann unter sommerlichen Bedingungen die angesaugte Luft gekühlt werden (Quelle: Architekten Traverso-Vighy, siehe Kapitel 6.1).





**Abb. 120:** Pontonkonstruktion im Heijsehafen von Rotterdam aus dem Jahr 2010



**Abb. 121:** Schematische Funktionsweise der natürlichen Lüftung im Ausstellungsgebäude. Durch die Anordnung von Zu- und Abluftöffnungen wird mit dem natürlichen Auftrieb der Luft die Thermik zur Kühlung des Innenraumes genutzt.

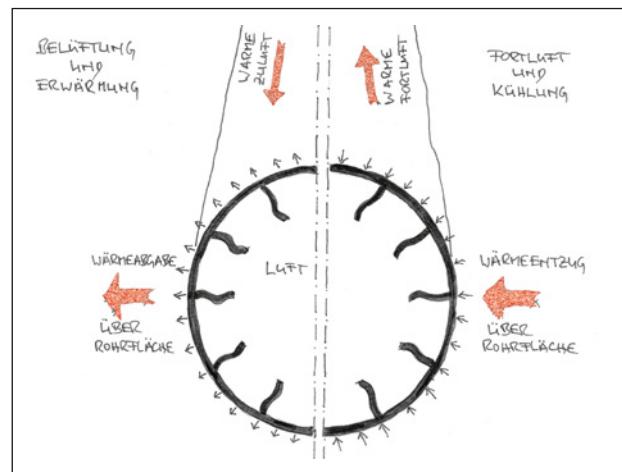
Zusätzlich kann durch die EFTE-Gebäudehülle genügend direkte Sonnenstrahlung in das Ausstellungsgebäude eindringen.

### 6.3.4 Integrative Lüftungskonzepte

Zweck einer mechanischen Belüftung ist der Luftaustausch in einem Raum während seiner Nutzung. Der CO<sub>2</sub>-Gehalt ist ein wichtiger Indikator für die Luftqualität. Auf Studien von Max von Pettenkofer im 19. Jahrhundert geht der bis heute gültige Grenzwert einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 0,15 % (1500 ppm) zurück. Während Gerüche nur das subjektive Empfinden beeinflussen, führt eine hohe Konzentration des geruchlosen Kohlendioxids in der Raumluft physisch zu Konzentrationsschwächen und Ermüdung.

Um eine ausreichend hohe Luftqualität zu gewährleisten, muss beispielsweise in Lern- und Klassenräumen nach etwa 15 Minuten das erste Mal ein kompletter Luftaustausch stattfinden. Das kann über großflächige Fensteröffnungen oder eine mechanische Belüftungsanlage geregelt werden. Der Vorteil der mechanischen Belüftung liegt in der konstant gehaltenen Qualität der Raumluft, außerdem ist die Anlage nicht auf ein zusätzliches Nutzerverhalten angewiesen. Weiterhin sind die Folgen von Stoßlüftungen durch Fensteröffnung Störungen durch Außengeräusche, Zugscheinungen, Kalt- oder Warmluft und Insekten.

**Abb. 122:** Vergrößerung der Kühl- und Heizflächen in Lüftungsrohren durch Anbringung von Stegen im Rohrinneren



Um den optimalen energetischen Wirkungsgrad einer Be- und Entlüftungsanlage zu erreichen, empfiehlt sich einen Kombination mit der Raumtemperierung. So kann durch einen erhöhten Rippenanteil an der Rohrwandung (siehe Abbildung 122) der Raumluft Wärme entzogen oder Kälte eingetragen werden. Zusammen mit den unbekleideten Sichtbetondecken überträgt oder entzieht die Zuluft, die in innenseitig gerippten Aluminiumrohren die Flachdecken durchströmt, Wärmeenergie auf bzw. aus dem Beton. Im Sommer können massive Geschossdecken in Verbund mit den Zulufttropfen wie Kühldecken wirken, die in der Lage sind, interne Wärmelasten der Räume aufzunehmen. Aus diesem Grund müssen sie unbekleidet bleiben, um den direkten Luftkontakt zu ermöglichen. Gleichzeitig mit der CO<sub>2</sub>-Entsorgung gewährleistet der Luftwechsel eine Abführung der Wärmelast. Im Winter dagegen sorgt die im Beton gespeicherte Wärmeenergie der internen Lasten für Erwärmung der Zuluft, so dass das Temperaturniveau der Zuluft in den Lüftungszentralen gesenkt werden kann.

Gegenüber einer klassischen Betonkerntemperierung über ein wassergeführtes System (siehe Kapitel 5.2), das nicht zu einer Senkung des CO<sub>2</sub>-Gehalts in der Raumluft sorgen kann, reduziert sich der Installations- und Wartungsaufwand auf das Medium Luft. Das Ziel, den Nutzer nicht in Haustechnikprozesse einzubeziehen wird mit steigendem Technisierungsgrad immer bedeutender, da ein Fehlverhalten des Nutzers direkte Auswirkungen auf das Bauwerk, die Anlagentechnik und die energetischen Verbräuche haben kann.

Der Weg der Außenluft durch ein Gebäude in einem integrativen Lüftungskonzept beginnt mit der zentralen Lüftungsanlage, die automatisch, ohne den Nutzer zu fordern, für einen kontinuierlichen Luftwechsel sorgt. Die Raumzonen erhalten ausschließlich frische, in den Lüftungsanlagen gefilterte und vorkonditionierte Außenluft. Die Flure und Hallen dienen als Überströmzonen zu Abluftschächten, die an die Lüftungszentralen angeschlossen sind. Damit findet im gesamten Gebäudevolumen ein vollständiger Austausch der verbrauchten Raumluft mit frischer Außenluft statt. Der geschlossene Kreislauf des Luftwechsels ermöglicht einen effizienten Wärmeübertrag der Abluft auf die Außen-

luft. Da die Wärmeenergie in der Abluft überwiegend durch die Nutzer und Nutzungsprozesse erzeugt wird, gilt die Wärmerückgewinnung als regenerative Energiequelle.

Die Aufbereitung der Zuluft findet in der Zentrale der haustechnischen Anlagen meist im Untergeschoß statt. So kann der Weg in die einzelnen Geschosse über zentrale Lüftungsschächte an den Treppenkernen führen, von dort in Horizontalkanälen entlang der Längswände in die einzelnen Raumzonen, bevor die Zuluft in Einzelrohren, die zur thermischen Aktivierung der Gebäudemasse in die Flachdecken einbetoniert sind, durch Überdruck an der Deckenstirnseite austritt und nach dem Prinzip der Querlüftung auf der gegenüberliegenden Seite über einen Spalt in der Bekleidung in den Hohlraum der Schrankzone überströmt. Unterdruck in den Erschließungsräumen sorgt dafür, dass die CO<sub>2</sub>-angereicherte Luft über sogenannte Überströmöffnungen, in Flure überströmt und über zentrale Schächte an den Treppenhauskernen wieder in die Lüftungszentralen zurückgeleitet wird. Um einen optimalen Zirkulationskreislauf zu erreichen, können direkt die Flure als »Lüftungskanäle« genutzt werden. Daher ist bewusst darauf zu achten, dass Fenster geschlossen bleiben, um dem Lüftungskonzept nicht entgegenzuwirken.

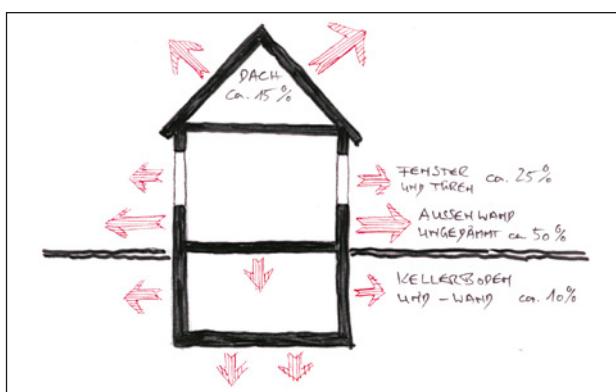
## 7 Maßnahmen im winterlichen Wärmeschutz

Auf den ersten Blick erscheinen die Möglichkeiten zur Ausführung von Außenwänden und Dächern vielfältig. Tatsächlich bestimmen jedoch nur die beiden Prinzipien einschalig oder mehrschalig das alltägliche Baugeschehen. Neben den konstruktiven und bauphysikalischen Aspekten sind handwerkliche und gestalterische Aspekte während der Planung von Bedeutung. Zusätzlich zu diesen doch eher traditionellen Gesichtspunkten innerhalb der Planung rückten zusätzlich die Bewertungen zur Nachhaltigkeit, zum Energieaufwand bei der Herstellung, zum Recyclingpotenzial und CO<sub>2</sub>-Ausstoß ins allgemeine Interesse. Obwohl die Grundprinzipien von Wand- und Dachaufbauten nicht besonders vielfältig sind, fällt eine einheitliche und vergleichbare Bewertung schwer, da eine Vielzahl unterschiedlicher Kombinationen untereinander möglich ist, was die ökonomische und ökologische Bewertung zwangsläufig erschwert.

**Tab. 23:** Übliche Lebensdauer von Wärmedämmstoffen als eingebaute Schicht  
(Quelle: Leitfaden Nachhaltiges Bauen, S. 169)

Lebensdauer von Dämmstoffen in Bauteilen		
Bauteil	Jahre	Jahre im Durchschnitt
Wärmedämmung	30–60	45
Steildach	40–60	50
Umkehrdach	40–60	50
Fußboden	30–100	65
Außenwand hinter Verkleidung	30–100	65
Wärmedämmverbundsystem	30–60	45
Kerndämmung	30–60	45
Unt. erdberührter Bodenplatte	80–120	100
Perimeterdämmung	30–55	45
Technische Wärmedämmung	15–25	20

**Abb. 123:** Schematische Übersicht zu den anteiligen Wärmeverlusten bei einem Einfamilienhaus bei ungedämmten Wänden. Die Dämmung der Wände reduziert den Wärmeverlust über die Außenwand auf ca. 10% des gesamten Heizwärmeverbrauchs.



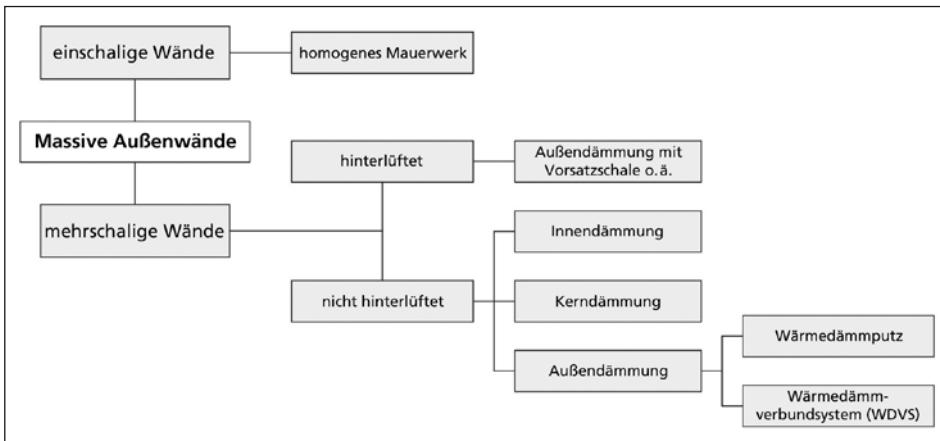


Abb. 124: Übersicht der Möglichkeiten zur Ausführung von Wandaufbauten

## 7.1 Prinzipien des Wandaufbaus

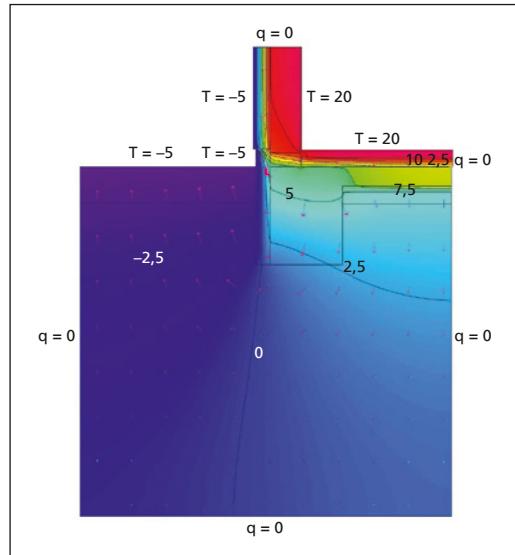
Die unterschiedlichen Prinzipien des Wand- oder Dachaufbaus bestimmen die Bauphysik des Bauteils und damit auch die zu treffenden konstruktiven Schutzmaßnahmen. Zusätzlich besitzt jeder Baustoff materialspezifische Eigenschaften. Somit kann nicht jeder Baustoff alle planungsrelevanten Anforderungen erfüllen. Dadurch ist die Planung immer eine Reaktion auf die Vorgaben des Architektenentwurfs, die technischen Notwendigkeiten, wie z.B. das Tragwerk oder die energetischen Anforderungen. Weiteren Einfluss haben darüber hinaus auch die Aspekte des Brandschutzes, des Unterhalts, der Recyclingfähigkeit und die lokalen klimatischen Bedingungen.

## 7.2 Gedämmte Außenbauteile – Wand, Dach, Bodenplatte

Um Gebäude wärmebrückenfrei zu konstruieren, ist die Lage des Dämmstoffes auf der Außenseite der thermischen Hüllfläche die anzustrebende Variante. Hierdurch werden sämtliche Materialwechsel der Konstruktion überdeckt. Daneben ist die Dämmung der Innenseite der Konstruktion ebenfalls eine Option, die jedoch eher im Sanierungsfall als nachträglich aufgebrachte Dämmung sinnvoll ist. Bei einer Innendämmung nehmen die energetischen Verluste aufgrund der Durchdringungspunkte der konstruktiven Wärmebrücken zu und haben einen höheren Einfluss auf die energetische Qualität der Hüllfläche. In der Konzeption von energetisch optimierten Gebäuden mit reduzierten Wärmeverlusten erfordert die Planung einen besonders sorgfältigen Umgang mit allen Bauteilanschlüssen, Materialwechseln oder Durchdringungspunkten. Zur Verringerung der Wärmebrückeneffekte sind dazu konsequent thermisch getrennte Bauteile notwendig. Sind Durchdringungspunkte, wie z.B. die Anschlüsse von Balkonplatten oder Vordächern



**Abb. 125:** Fußpunkt einer Kalksandsteinwand mit einem dämmenden Kimmstein am Materialwechsel zwischen Betonbodenplatte und aufgehender Wand



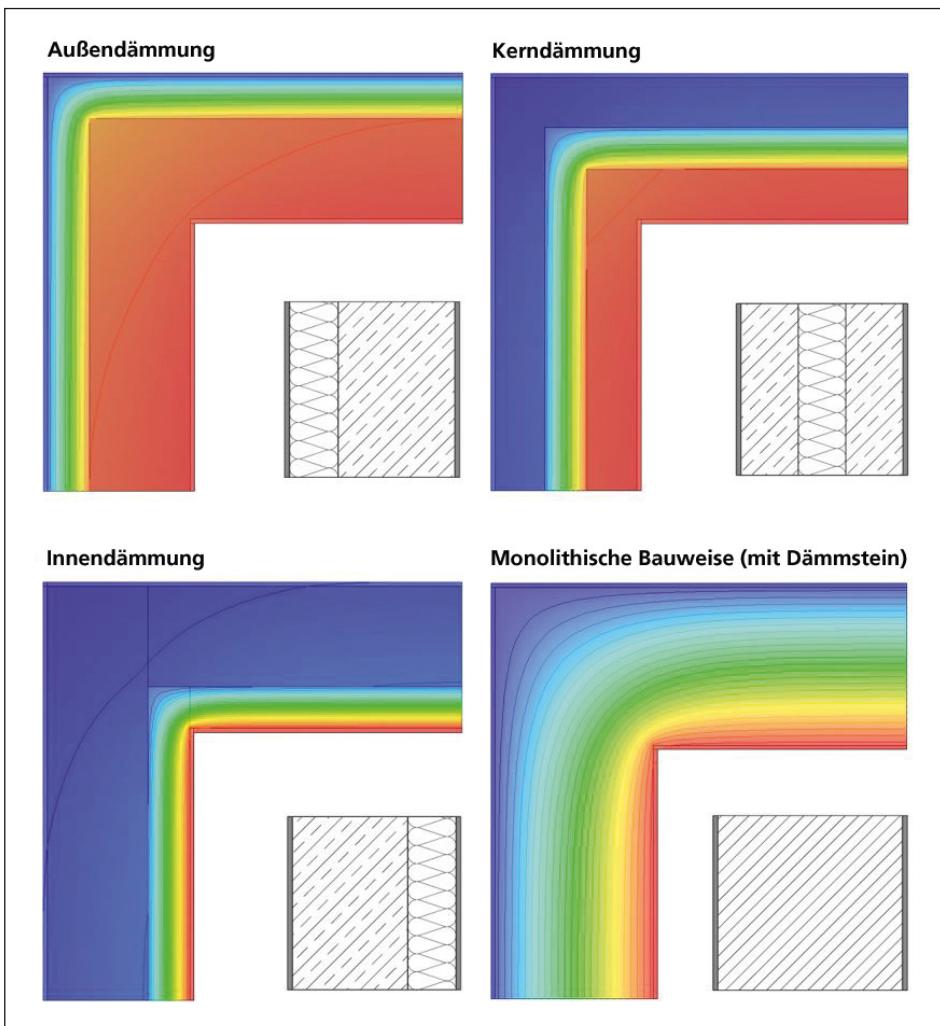
**Abb. 126:** Wärmebrückensimulation eines Wandfußpunktes mit einem Schaumglas-Dämmstein und der Dämmebene oberhalb der erdberührten Bodenplatte

unvermeidbar, müssen Trennungen eingeplant werden, die einen möglichst hohen Wärmedurchgangswiderstand besitzen. Grundsätzlich gilt die Anforderung der DIN 4108-2, dass auskragende Balkonplatten, Attiken oder freistehende Stützen ohne zusätzliche Wärmedämmmaßnahmen unzulässig sind.<sup>44</sup> Ziel jeder Dämmmaßnahme muss es sein, Unterbrechungen in der Dämmebene auszuschließen.

Nachfolgende Abbildungen zeigen bei gleicher Geometrie die unterschiedlichen Einflüsse der Lage der Dämmebene auf den Temperaturfluss im Bauteil und die wärmebrückenbedingten Verluste. Dargestellt sind drei typische mehrschalige Aufbauten als Außen-, Kern- und Innendämmung und zum Vergleich die monolithische Bauweise, welche durch Leichtbeton oder mit Dämmmaterial verfüllten Mauerwerkssteinen erreicht werden kann.

Die Simulationen zeigen, dass innerhalb jeder Dämmebene der stärkste Temperaturabfall stattfindet. Bei der Temperaturauswertung ist ersichtlich, dass eine Innendämmung für die höchste Temperatur auf der Wandinnenseite sorgt. Damit wird in Bezug auf die Raumtemperatur ein höheres Behaglichkeitsniveau erreicht. Der Einbau von Dämmmaterialien verändert die Wärmeströme und hat Einfluss auf die Wärmeverluste. Die maßgebliche Kenngröße bildet dabei die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  eines Baustoffs.

44 vgl. DIN 4108-2:2013-02; S. 18 Pkt. 6.1 Mindestwärmeschutz im Bereich von Wärmebrücken



**Abb. 127:** Vergleichende Wärmebrückendarstellung bei unterschiedlichen Dämmvarianten

Die Effektivität einer Dämmschicht besitzt keinen linearen Verlauf. Die Wirkung ist nicht proportional zur Dämmschichtdicke. Eine wenige Zentimeter dicke Dämmebene besitzt, verglichen mit einem ungedämmten Außenbauteil, einen besonders hohen Wirkungsgrad. Bei höheren Dicken flacht die Wirkung ab.

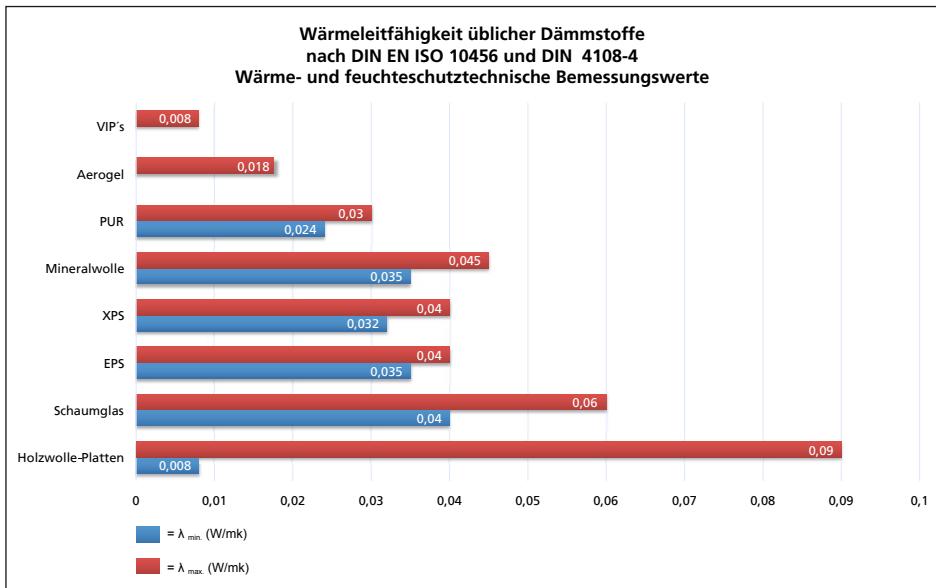
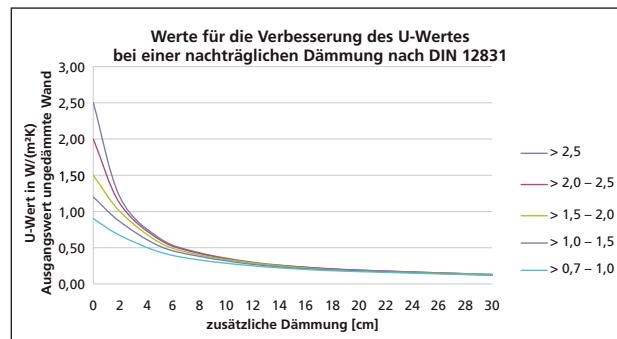


Abb. 128: Wärmeleitfähigkeit üblicher Dämmstoffe

Abb. 129: Verbesserung des U-Wertes von vorhandenen Wänden mit dem Auftrag einer nachträglichen Dämmung (Quelle: DIN EN 12831, Anlage 1, Tab. A.3, S. 24)



### 7.3 Potenzial monolithischer Wandkonstruktionen

Neben den heute weit verbreiteten mehrschichtigen Konstruktionen, bei denen man Baustoffe, wie zum Beispiel Dämmmaterial und Mauerwerk so kombiniert, dass jeder Baustoff nur eine konstruktive Anforderung erfüllt, besteht immer noch die Möglichkeit nahezu traditionell Fassaden monolithisch auszuführen.

Die steigenden Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) rückten zuerst die Eigenschaften von reinen Dämmstoffen in den Fokus. Mit der einfachen U-Wert-Betrachtung schien nur das Dämmmaterial die richtige und einfachste Lösung in der bauphysikalischen Auslegung von Wandkonstruktionen zu sein. Mit diesen Konstruktionen eröffneten sich jedoch neue Probleme, die bis dahin bei rein monolithischen



**Abb. 130:** Draufsicht auf die Brüstung in der Rohbauphase im Fensterbereich durch den monolithischen Wandaufbau des hochgedämmten Mauerwerk des Gebäudes »2226« von Baumschlager Eberle (Quelle: Fa. Wienerberger Ziegelindustrie GmbH).

Konstruktionen nicht bekannt waren. Die außenseitig gedämmte Wand neigte zur schnellen Veralgung und farblichen Verfärbung, wenn kein mineralischer Außenputz verwendet wurde, sondern dünnlagige Kunstharszputze. Um der Veralgung vorzubeugen, wurden und werden heute noch Kunstharszputze mit Algiziden ausgestattet. Da diese jedoch wasserlöslich sein müssen, um von den Algen aufgenommen zu werden, waschen diese Biozide leicht aus und wandern in das angrenzende Erdreich. Ähnliche Probleme zeigten sich mit der Nutzung von HBCD<sup>45</sup> als flammenhemmendes Mittel im EPS-Dämmstoff, das 2008 nach ECHA als besonders besorgniserregender Stoff bewertet wurde. HBCD wurde als Flammenschutzmittel dem EPS beigelegt, um als schwer entflammbar klassifiziert werden zu können. 2014 wurde durch die EU ein Verbot zur Nutzung von HBCD als Flammenschutzmittels in EPS ausgesprochen. Schrittweise muss nun bis 2019 in allen EU-Mitgliedstaaten dieses Verbot umgesetzt und auf andere Flammenschutzmittel umgestellt werden. In diesem Kontext muss daher die Nutzung traditioneller Bauweisen und Baustoffe gesehen werden.

Alternativ zu den einfachen aufgeklebten oder aufgedübelten Dämmstoffen fanden die Hersteller von traditionellen Ziegeln einen Weg, diesen Baustoff hinsichtlich des Wärmedurchgangswiderstandes zu verbessern und die Anforderungen an den energetischen Wärmeschutz zu erfüllen. Dies geschah zwar zu Lasten des Tragverhaltens des Mauerwerksteins, doch stellt die Möglichkeit, eine Wand monolithisch und beidseitig verputzt auszuführen, eine Alternative zu dem mehrschichtigen Wandaufbau dar. Nicht nur, dass in der Herstellung weniger Arbeitsschritte notwendig sind, auch in der Abbruchphase lassen sich die rein mineralischen Baustoffe leichter fraktionieren und dem Stoffkreislauf zurückzuführen.

Moderne Porenbetonsteine oder mit Dämmmaterial verfüllte keramische Planziegel erreichen Lambda-Werte von  $\lambda_R = 0,09 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  bis  $\lambda_R = 0,08 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ . Wählt man einen mit Dämmstoff verfüllten keramischen Planziegel, sind Lambda-Werte von  $\lambda = 0,06 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$  möglich.

Der Neubau »2226« der Architekten Baumschlager Eberle in Vorarlberg/Österreich wurde monolithisch aus hochgedämmten Ziegeln errichtet. Der zweischalige Ziegelwand-

45 HBCD = Hexabromcyclododecan

**Abb. 131:** Gebäude »2226« der Architekten Baumschlager Eberle in Lustenau/Österreich (Quelle: Baumschlager Eberle)



aufbau, mit jeweils 38 cm Wandstärke, erreicht einen U-Wert von  $0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Während die raumseitige Ziegelwandschale die statische Anforderung an das Tragwerk übernimmt, dient die äußere Mauerwerksschale hauptsächlich dem Wärmeschutz. Um die Wärmebrückeneffekte von horizontalen Lager- und Stoßfugen zu reduzieren, wurden die innere und äußere Schale gegeneinander versetzt angeordnet. Durch die Nutzung eines Ziegelsteins für das Mauerwerk, konnten die Wandflächen mit einem dicklagigen mineralischen Putz belegt und Putze gewählt werden, die nicht mit Bioziden ausgestattet sind.

Der Projektname »2226« ist zugleich auch das energetische Programm des Entwurfs und weist auf den Schwankungsbereich der Innenraumtemperaturen hin, in dem sich das Gebäude im Jahresgang einpendelt, ohne dazu Lüftungs- oder Heizungsanlagen zu nutzen. Um den Anforderungen des sommerlichen Wärmeschutzes und den Behaglichkeitskriterien gerecht zu werden, ist die massive Ziegelwand ebenfalls vorteilhaft. Die Konstruktion, die durch Geschossdecken aus Betonfertigteilen ergänzt wird, wirkt mit ihrer Masse ausgleichend auf den Temperaturverlauf. Unterstützt wird dieser langsam verlaufende Erwärmungsprozess durch Räume mit großen Höhen zwischen 3,40 m in den Obergeschoßen, 4,50 m im Erdgeschoss. Mit diesem höheren Raumluftvolumen verringern sich ebenso die thermischen Schwankungen in den Sommermonaten. Die größere Raumhöhe wirkt sich positiv auf die Wärmeverteilung und das Aufwärmverhalten der Räume aus. Um während der Sommermonate über die Nachtstunden die Innenräume zu kühlen, entschied man sich gegen eine Lüftungsanlage mit Luftverteilungskanälen und für einfache Lüftungsklappen. Diese wurden im Fensterelement neben den Fensterflügeln eingebaut. Die Lüftungsklappen können vom Nutzer von Hand bedient werden, sind aber im Normalfall sensorgesteuert und öffnen zur Kühlung in den Nachtstunden oder wenn der  $\text{CO}_2$ -Gehalt im Innenraum die kritischen Grenzwerte erreicht.

Im Jahr nach der Fertigstellung wurde ein Monitoring zu den klimatischen und energetischen Bedingungen in dem Gebäude von Junghans und Widerin<sup>46</sup> für das Architekturbüro Baumschlager Eberle durchgeführt. Das folgende Diagramm zeigt den Temperaturverlauf im Monat April. Gemessen wurde die innere und äußere Temperatur, sowie

46 Prof. Dr. Lars Junghans und Dr. (ETH) Widerin

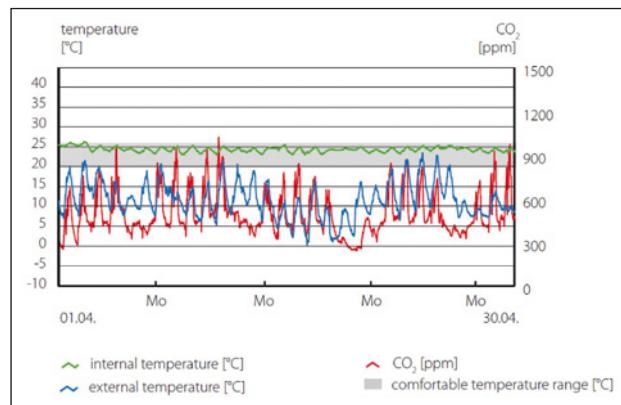


**Abb. 132:** Innenansicht der Fensterelemente im Gebäude »2226« mit geschlossener und geöffneter Zuluftklappe (Quelle: Baumschlager Eberle)

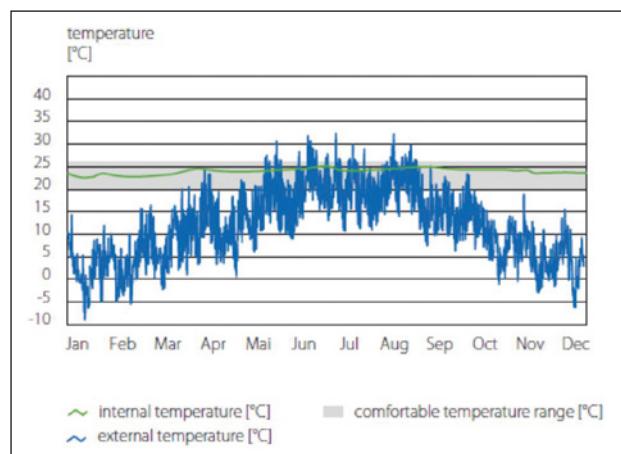
der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Innenraum in ppm (parts per million). Die Messung zeigte die jahreszeitlich üblichen Unterschiede der Außenlufttemperatur von Tag zu Nacht, sowie den Temperaturverlauf im Gebäudeinneren. Die Messungen dokumentierten einen ausgeglichenen Temperaturverlauf im Innenraum. Dabei lagen die Temperaturen zwischen ca. 22°C bis 26°C, gegenüber Außentemperaturen, die im Monatsverlauf noch bis auf ca. 0°C fielen und über den Tag bereits vereinzelt bis auf 23°C anstiegen. Trotz einer Abweichung von bis zu  $\Delta$  25 K von innen nach außen im Tagesgang, stellte sich der Verlauf der Temperaturen im Innenraum während des Monats April sehr ausgeglichen dar. Ein weiteres Monitoring erfolgte für den Monat September. Hier bestätigten sich in der Auswertung die Ergebnisse vom April für die Innenraumtemperaturen, bei allerdings höheren Außentemperaturen.

Die Auswertung zum Jahresverlauf zeigte, dass die Innentemperaturen in den Monaten von Februar bis Mai eine zeitlich verzögerte Unterschreitung des Komfortbereichs haben. Diese zeitliche Verzögerung stellt sich ebenfalls unter sommerlichen Bedingungen dar. Erst ab Juli beginnt eine leichte Überschreitung der Behaglichkeitskriterien von max. 26°C, obwohl schon im Mai die ersten Tage mit Außentemperaturen von über 30°C gemessen wurden. Der Jahresgang bestätigte die zu erwartenden Eigenschaften, die geprägt sind von den gedämpften und zeitlich verzögerten Temperaturverläufen im Innenraum, bei monolithischen Konstruktionen.

**Abb. 133:** Messwerte des Monatsverlaufs im April der Außen- und Innentemperaturen sowie des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Raumluft



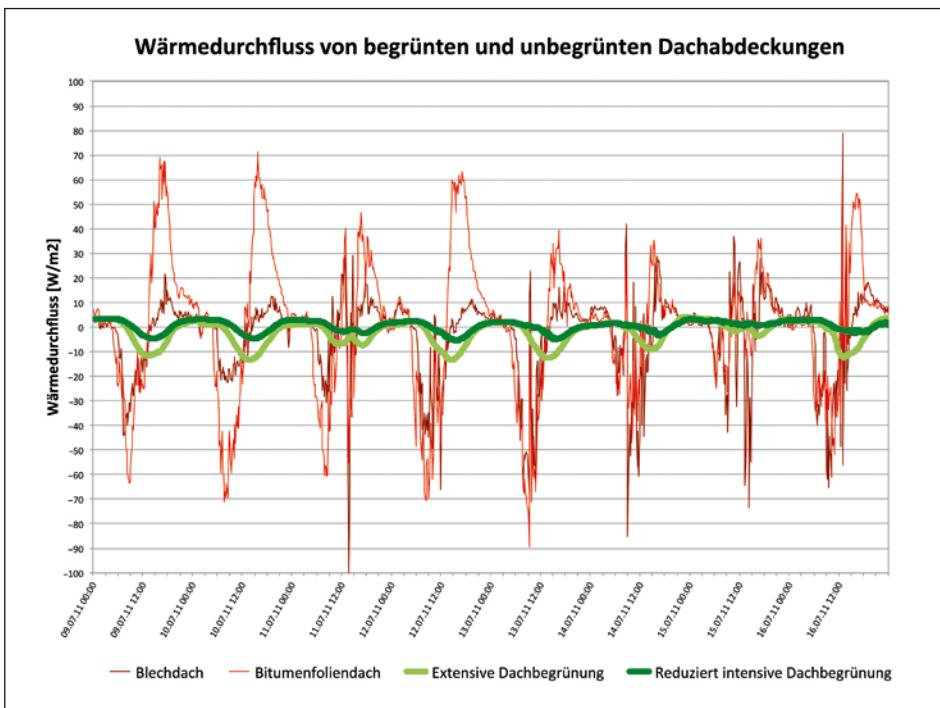
**Abb. 134:** Temperaturverlauf im Inneren von »2226« im Vergleich zu den Temperaturen im Außenbereich im Jahresgang



Die Ergebnisse der Untersuchungen für das Gebäude »2226« zeigen deutlich zu welchen positiven und nachhaltigen Ergebnissen eine Planung für den Nutzer führt, wenn sowohl Bauphysik, Baustoffkunde und Entwurf ganzheitlich betrachtet werden.

## 7.4 Eigenschaften von begrünten Dächern und Fassaden

Begrünte Dächer und Fassaden bieten stadtökologische und klimatische Vorteile. Sie bieten Lebensraum für Insekten, binden Stäube und tragen damit zur Reinigung der städtischen Luft bei. Weiterhin wirken Gründächer wärme- und feuchteregulierend im städtischen Umfeld, wenn sie regenwasserrückhaltend sind. Mit der Eigenschaft Regenwasser zurückzuhalten, beeinflussen begrünte Konstruktionen zudem die Auslegung der Regenwasserentsorgung positiv. Hinsichtlich ihrer energetischen Eigenschaften zum winterlichen, wie sommerlichen Wärmeschutz sind diese Konstruktionen jedoch noch nicht umfänglich bewertet worden. In den anzuwendenden Normen zum Feuchte- und



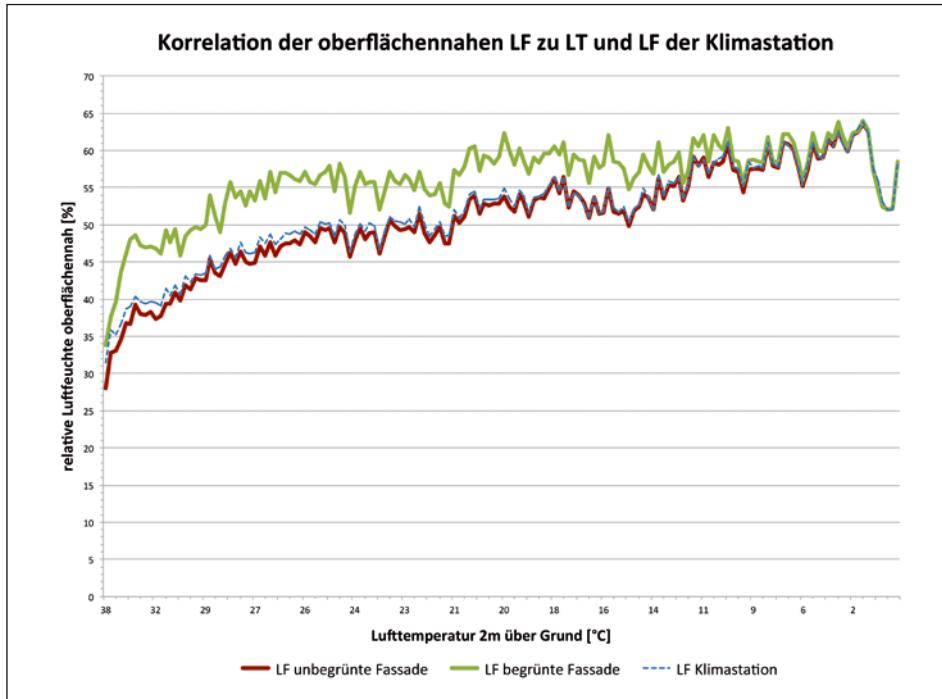
**Abb. 135:** Messergebnisse zum Wärmefluss bei unterschiedlichen Dachkonstruktionen, wie Blechdach, Bitumenfoliendach, Dach mit extensiver und reduzierter intensiver Dachbegrünung. Die geringen Ausschläge der Gründachvarianten verdeutlichen den puffernden Einfluss und den geringen Einfluss der auftreffenden Globalstrahlung für den Innenraum unter sommerlichen Bedingungen (Messungen vom 09.07.2011 bis 16.07.2011) (Quelle: Leitfaden »Grüne Bauweisen für Städte der Zukunft«, S. 14).

Wärmeschutz finden sich keine Vorgaben, wie begrünte Hüllflächen bewertet werden können.

Die begrünte Fassade trägt dazu bei, mit der Eigenverschattung die thermischen Schwankungen in der tragenden Konstruktion zu reduzieren und führt damit zu geringeren Oberflächenspannungen. Grundsätzlich bieten Fassadenbegrünungen die aufgeführten Vorteile:

- Wärmedämmung durch ein Luftpolster zwischen Blattwerk und Wand
- Windschutz durch Konvektion und weniger Wärmeverlust, da der Wind nicht direkt an der Wand angreifen kann
- Schallschutz
- Kühlung
- Luftverbesserung

Um die bestmögliche Ausnutzung aller Eigenschaften zu realisieren, sollte darauf geachtet werden an der Südfassade blattabwerfende und an den anderen Fassaden immergrüne Pflanzen zu setzen.



**Abb. 136:** Gegenüberstellung der Luftfeuchtigkeit an einer verputzten Fassade und einer begrünten Fassade, in Beziehung zu den Messwerten zur Luftfeuchtigkeit einer Klimastation (Quelle: Leitfaden »Grüne Bauweisen für Städte der Zukunft«, S. 15).

Pflanzen können aber ebenfalls auch als Begrünung von Dachflächen dienen. Bei Dachflächen ist die Begrünung auf die Lage und Ausrichtung des Gebäudes abzustimmen. Grundsätzlich schützt eine Dachbegrünung die Abdichtungsebene unterhalb des Gründachaufbaus vor UV-Strahlung und thermischen Spannungen, die aus dem Temperaturwechsel über den Tag und der direkten solaren Bestrahlung resultieren können.

Untersuchungen des österreichischen Verbandes für Bauwerksbegrünung zeigten, dass sowohl bei wand- wie auch bodenbedeckenden Begrünungssystemen eine Verbesserung des Temperaturunterschiedes unter winterlichen Bedingungen von 3 K mit begrünten Bauteilen möglich ist.

Allerdings hängt die Dämmfähigkeit des Aufbaus auch deutlich vom Grad der Durchfeuchtung ab, da natürlich Wasser in den Hohl- und Porenräumen des Substrats die Wärmeleitfähigkeit des Aufbaus erhöht. Untersuchungen von Pfoser zeigten im Versuch, dass ein Substrat mit 10 cm Stärke bei einem extensiv begrünten Dach zu einer Verbesserung des Wärmeübergangswiderstandes von 0,14 bis 0,40 m<sup>2</sup>K/W führte.

Weitere Untersuchungen des Instituts für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der Universität für Bodenkultur in Wien belegten nicht nur, wie in Abbildung 135 zu erkennen, einen reduzierten Wärmefluss durch den Dachaufbau bei Gründächern, sondern zeigten zudem die Auswirkung auf die lokale Luftfeuchtigkeit vor Grünfassaden. Die Messwerte der Luftfeuchtigkeit an einer Grünfassade (grüner Graph) belegen, dass vor



**Abb. 137:** Ausschnitt der begrünten Fassade des Musée du Quai Branly in Paris, Architekt Jean Nouvel, Gartenkünstler Patrick Blanc



**Abb. 138:** Schwimmhalle mit teilbegrünter Fassade vor einer Trapezblechfassade in Hamburg-Wilhelmsburg (Quelle: Generalplaner: bs2 architekten gmbh; Fassadenentwurf: Allmann Sattler Wappner Architekten GmbH)

einer gleichgroßen Wand deutlich höhere Luftfeuchtigkeit gemessen wurde. Dieser Effekt trägt durch den Verdunstungsprozess zur Kühlung im Sommer bei, weil der Umgebung Wärme entzogen wird. Damit sinkt die Umgebungstemperatur und das Wohlbefinden der Passanten verbessert sich.

Der französische Gartenarchitekt Patrick Blanc entwickelte auch vertikale Gärten auf Fassaden bei innerstädtischen Bebauungen, wie an dem Musée du Quai Branly in Paris des Architekten Jean Nouvel. Durch ihren konstruktiven Aufbau helfen diese Fassaden auf unterschiedliche Weise das innerstädtische Klima zu verbessern. Anfallender Regen wird von der Fassadenkonstruktion aufgenommen, zwischengespeichert und zeitverzögert über die Verdunstung wieder abgegeben. Da diese Fassaden jedoch zusätzlich ein eigenes Bewässerungssystem benötigen, wird Wasser für die Pflanzen täglich in das

Dachkonstruktionen	Abflussbeiwerte (C) für Dachflächen nach DIN 1986-100
Intensivbegrünungen	0,3
Extensivbegrünungen ab 10 cm Aufbauhöhe	0,3
Extensivbegrünungen unter 10 cm Aufbauhöhe	0,5
Flachdach mit Kiesschüttung	0,5
Wasserundurchlässige Dachflächen	1,0

**Tab. 24:** Abflussbeiwerte von Dachkonstruktionen nach DIN 1986-100:2008-05 Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke, Auszug aus Tabelle 9, als Minderungsfaktoren zur Auslegung von Regenwasser-Entwässerungsanlagen.

Fassadensystem eingetragen. Daraus resultiert eine fortlaufende Kühlung in den angrenzenden Bereichen mittels adiabatischer Verdunstungskühlung. Nach Pfoser bieten damit diese begrünten Flächen ein hohes Ausgleichspotenzial zur Reduzierung des Einflusses von Hitzeinseln in Innenstädten.

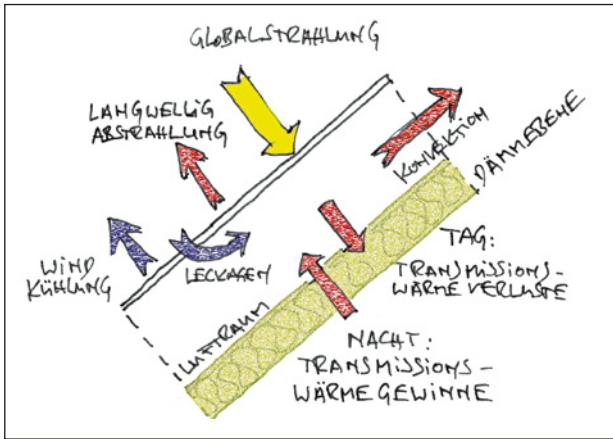
Vor der eigentlichen tragenden Außenwand steht selbständig die Tragstruktur der begrünten Fassade. Zum Schutz der Außenwand vor Durchwurzelung und Zerstörung werden zusätzliche konstruktive Maßnahmen getroffen. Der Aufbau besteht aus einem tragenden Gerüst aus Aluminiumprofilen. Zwischen dem Traggerüst und der Außenwand befindet sich eine Luftsicht, auf dem Traggerüst selbst wird eine Lage aus PVC-Platten und einem Filzgewebe aufgebracht. Da die gesamte Konstruktion nicht schallhart bzw. reflektierend ist, bietet die Fassade dazu noch den Vorteil eines Schallabsorbers, ein Aspekt der gerade im innerstädtischen Bereich eine deutliche Verbesserung der Aufenthaltsqualität mit sich bringen kann.

Die nach außen getragene und als Gestaltungselement genutzte Begrünung wird auch in neueren Projekten gerne verwendet, um die Wohn- und Lebensqualität durch ein kleines Stück Wald vor dem eigenen Fenster zu erhöhen. Das Projekt »Bosco Verticale« in Mailand aus dem Jahr 2014 wurde mit dem Internationalen Hochhauspreis ausgezeichnet. In der Planung und Projektumsetzung fand eine enge Zusammenarbeit zwischen Architekten, Botanikern und Landschaftsplanern statt. Jede Wohnung bekam einen Zugang zu mindestens einer Terrasse, die eine Gartennutzung direkt an der Hochhauswohnung ermöglicht.

## 7.5 Dach- und Wandabsorber

Horizontale und zum Süden geneigte Dachflächen stellen im Grunde die einfachste mögliche Form eines Solarkollektors dar, der Strahlung in Wärme umwandelt. Hierbei hat die Art und Weise der Dachkonstruktion auch unterschiedlichen Einfluss auf die möglichen Wärmegewinne. Während bei vollgedämmten Warmdachkonstruktionen kaum nutzbare energetische Gewinne zu erzielen sind, da nur die obere Abdichtungslage erwärmt wird und die Dachdämmung die Wärmeströme ins Innere verhindert, stellt das hinterlüftete Kaltdach eine einfache Vorform der heute üblichen unverglasten Solarkollektoren dar.

Allerdings lagen das thermische Verhalten und die Absorptionsfähigkeit von Kaltdachkonstruktionen kaum im Zentrum des allgemeinen Interesses. Die mindernden klimatischen Einwirkungen aus Wind (Konvektion) auf einen Direktabsorber ließen diese Konstruktionsweise durch die geringeren Nutzungspotenziale in den Hintergrund treten. Dabei kann mit der Nutzung von Dachflächen ohne großen Mehraufwand eine »sowieso« notwendige Konstruktion als Absorber genutzt werden. Tatsächlich findet man in den vergangenen Jahren immer wieder Dachsysteme, die versuchen die Erwärmung der Dachhaut, ohne adaptive Aufbauten zu nutzen und in ein haustechnisches Konzept einzubinden.



**Abb. 139:** Schematische Übersicht der sich gegenseitig beeinflussenden Prozesse des Wärmeübergangs oder der Reflexion in einem geneigten Dach

Bereits frühere Untersuchungen, wie der im Recknagel dargestellte Tagesverlauf der Oberflächentemperatur auf einem Flachdach, zeigte, dass im Laufe des Tagesgangs ein Temperaturanstieg bis zu 50 K bei einem gedämmten Dach möglich ist<sup>47</sup>.

In eine ähnliche Richtung weist die Untersuchung von Baum an der Universität Göttingen. Im Rahmen seiner Dissertation untersuchte Baum die Nutzung von Stauwärme an einem herkömmlichen Kaltdach mit Kalzip-Eindeckung an der Jugendherberge Damme. Bei diesem realisierten Projekt wurde die Luft im Zwischenraum unterhalb des Kalzip-Bleches vorerwärm, mit der Unterstützung von Ventilatoren am First abgesaugt und in einem Lüftungskanal zu einem Wärmetauscher geführt. Dort wurde die zugeführte Wärmeenergie auf einen Solekreislauf, der an eine Wärmepumpe angebunden war, übertragen. Der unverglaste Dach(haut)kollektor wurde in ein System aus Wärmepumpe, Pufferspeicher und Gasbrennkessel eingebunden, um Heizungswasser und Brauchwasser unter allen Wetterbedingungen sicherzustellen und auf die notwendige Temperatur im Betrieb zu bringen.

Die Untersuchungen an der Jugendherberge Damme zeigten, dass eine Erwärmung des wärmeübertragenden Mediums zwischen der Eintrittstemperatur  $T_e$  und der Austrittstemperatur  $T_a$  von ca. 21 K an sonnigen Tagen<sup>48</sup> bei einer solaren Bestrahlung von max. 950 W/m<sup>2</sup> möglich sind. Als Spitzenwert wurde bei dieser Konstruktion an einem sonnigen Sommertag ein Temperaturanstieg von 24 K ermittelt. Allerdings zeigten die Untersuchungen auch, dass an einem sonnigen Wintertag, zu der Jahreszeit mit dem höchsten Heizwärmebedarf, der Temperaturanstieg in der Luft nur bei 6 K lag.<sup>49</sup> Nach Angabe der Universität Göttingen liegen die Vorteile der Stauwärmenutzung in einer erhöhten Leistungsziffer der Wärmepumpe und dadurch geringerer elektrischer Leistungsaufnahme. Zusätzlich konnten kostengünstige Energiegewinne erwirtschaftet werden, da man ein Metalldach dazu nutzte, das sowieso gebaut worden wäre. Die Untersuchungen zeigten auch, dass bereits kurze Sonnenscheinphasen zu Energiegewinnen führen, die wiederum

47 vgl. [33], CD 22, Kap. 1.1.4

48 vgl. [33], S. 53, Abb.15

49 vgl. [33], Abb. 14

**Tab. 25:** Wärmetechnische Bemessungswerte unterschiedlicher Dachbaustoffe nach DIN V 4108-4 und DIN EN ISO 10456

Werkstoff der Dachdeckung	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m · K)]	C [J/(kg · K)]
Dachschiefer	2 700–2 800	2,2	800–1 000
Betondachstein	2 100	1,5	1 000
Tonziegel	2 000	1,0	800
Faserzement	1 750	0,58	1 000
Aluminium-legierungen	2 800	160	880

den Primärenergieverbrauch reduzieren und so dazu beitragen den Ausstoß von klimarelevanten Schadgasen zu reduzieren.

Auf eine ähnliche Weise näherten sich zwei Arbeiten an der Bergischen Universität Wuppertal dem Thema der passiven Nutzung solarer Energien. Bei beiden eigenständigen Arbeiten von Braun [7] und Duzia [9] stand die Bewertung der Erwärmung von konventionellen Dachkonstruktionen im Vordergrund. Auch hierbei sollten traditionelle Formen der Bedachung nicht durch zusätzliche Elemente verfremdet werden, sondern die Wärmegewinne in der Luftsicht unterhalb von Kaltdachkonstruktionen erfasst werden.

Beide Arbeiten entstanden auch mit Blick auf die Anforderungen der DIN 1946-6 für Lüftungsanlagen im Wohnungsbau, den Vorgaben der Energieeinsparverordnung und den Anforderungen an den Denkmalschutz. Mit der Überarbeitung der DIN 1946-6 von 2009, die ein Lüftungskonzept für Wohnungen bzw. Gebäude verpflichtend machte, wenn ein Drittel aller Fenster ausgetauscht oder das Dach neu abgedichtet wird, stellte sich die Frage, auf welche Weise der Planer die Energieeinsparverordnung einhalten kann, die ein dichtes Gebäude mit ausreichendem Luftwechsel fordert.

Die Regelung der Energieeinsparverordnung, die im § 6 Dichtheit und Mindestluftwechsel<sup>50</sup> steht, besagt, dass der Planer ein dauerhaft dichtes Gebäude mit einem zum Zweck der Gesundheit ausreichenden Mindestluftwechsel schuldet. Hierzu müssen zusätzlich weitere Aspekte betrachtet werden. Auf der Grundlage dieser bauaufsichtlich eingeführten Norm sind die Anforderungen an eine ausreichende Lüftung erfüllt, wenn das Raumluftvolumen innerhalb von zwei Stunden mindestens einmal ausgetauscht wird. Sieht man diese Anforderungen im Kontext zu diversen Gerichtsurteilen wird offensichtlich, dass das nutzerabhängige Lüften nicht ausreicht, um alle Anforderungen auf eine einfache Weise zu erfüllen.

Vor diesem Hintergrund entstanden die Arbeiten von Braun und Duzia. Ziel war es die Vorerwärmung der Außenluft in einem Kaltdach zu beschreiben und zu bewerten, um damit eine Grundlage zu schaffen, wie auf eine einfache Weise das Temperaturniveau der Außenluft erhöht werden kann, bevor die kalte Außenluft in den Wohnraum eingeleitet wird und mit zusätzlichem Energieaufwand nacherwärmten muss.

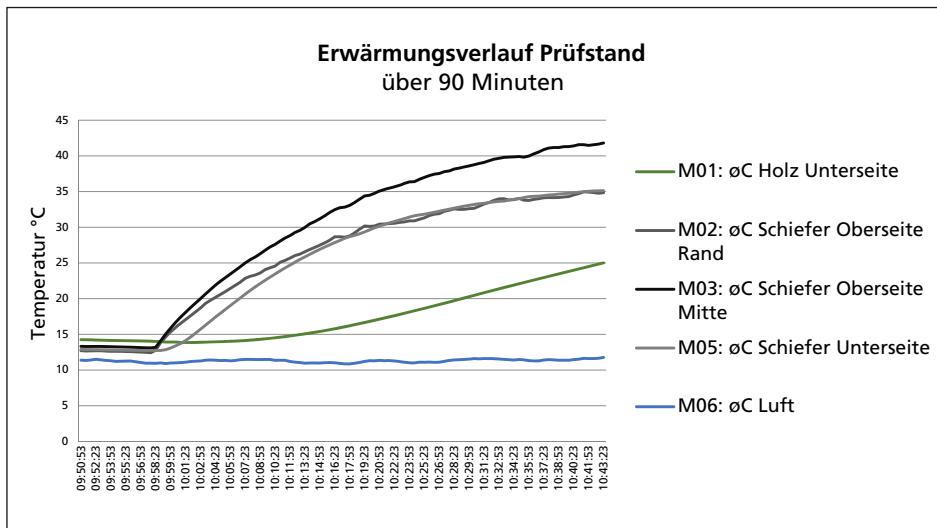
50 vgl. EnEV 2014, nichtamtliche Lesefassung vom 18. Nov. 2013



**Abb. 140:** Einfaches Lüfterelement für den Einbau im Dachbereich als Bauteil einer Lüftungsanlage nach DIN 1946-6. Die Luft strömt unterhalb der Dachpfannen zum Lüftungsschlitz (Quelle: Fa. Renson).

Zur Erfüllung der Anforderungen der DIN 1946-6 ist im Wohnungsbau von einer konstanten Grundlüftung als sogenannte Nennlüftung auszugehen. Hierbei kann zu einem bestimmten und bauwerkabhangigen Anteil auch die Infiltration also die konstruktionsbedingte Undichtigkeit berücksichtigt werden. Der weitere zusätzlich notwendige Anteil der Nennlüftung muss von außen zugeführt werden. Dies kann durch Wand- oder Fenstereinbauteile geschehen. Im einfachsten Fall wird dabei über einen Außenluftdurchlass (ALD) Frischluft in die Wohnungen geleitet. Diese Form der Zwangslüftung resultiert aus einem dauerhaften Unterdruck, der mit einem im Inneren der Wohnung eingebauten Abluftventilator erzeugt wird. Die so in die Wohnung gelangte Frischluft besitzt meistens das Temperaturniveau der Außenluft, falls nicht Geräte mit Wärmerückgewinnung zum Einsatz kommen. Aus dem Einströmen der kalten Außenluft kann mit dem Eintritt der nicht vorerwärmten Außenluft resultieren, dass punktuell wieder Bauteile auskühlen und zu einem Befall mit Schimmel pilz neigen, wenn dort zugleich Kondensat ausfällt. Zur Verbesserung dieser nachteiligen Bedingung und dem zusätzlichen Bedarf zur Raumluft erwärmung ist die passive Vorerwärmung von Luft vorteilhaft, wenn die in den Raum eintretende Frischluft vorher über eine Fläche geleitet werden kann, die durch solare Bestrahlung ein höheres Temperaturniveau besitzt. Auf diese einfache Weise lassen sich über die Wärmestrahlung auch Wärmegewinne für die Frischluft erzielen. Die beiden Untersuchungen an der Bergischen Universität Wuppertal in der Abteilung Bauingenieurwesen deuten in diese Richtung.

Die Untersuchung für Schieferdachkonstruktionen erfolgte an einem mit Messtechnik ausgestatteten Prüfstand. Während der Messungen zeigte sich recht schnell, dass die in Deutschland übliche Verlegetechnik von Schiefer auf einer Vollschalung aus Holz nachteilig für die energetische Nutzung und Vorerwärmung der Luft unterhalb der Unterkon-



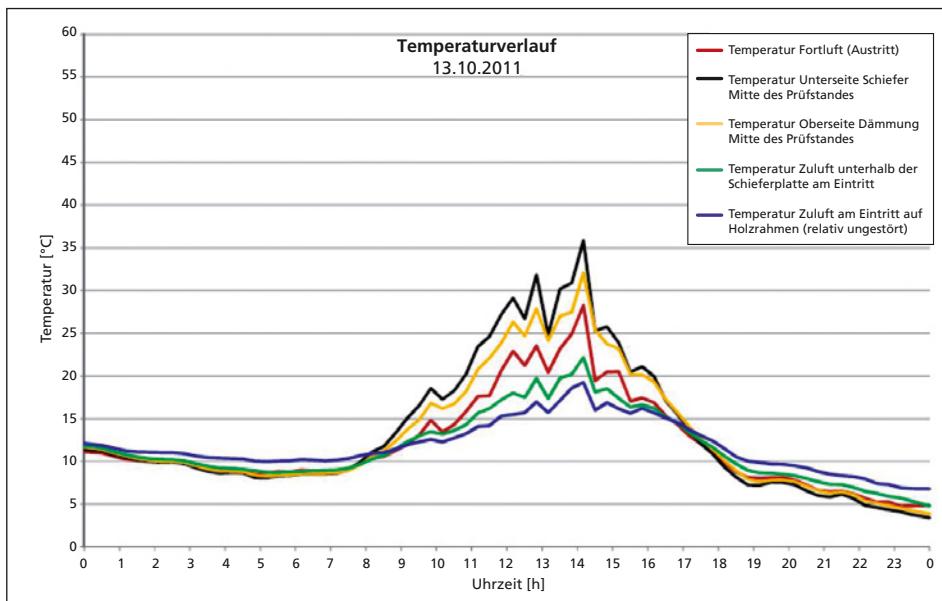
**Abb. 141:** Erwärmungsvorgang über 90 Minuten am 12.03.2012 bei ungestörten Verhältnissen und einer Bestrahlung von  $250 \text{ W/m}^2$ , Lufttemperatur der Umgebung um  $12^\circ\text{C}$

struktion ist. Zwar stiegen die Oberflächentemperaturen der beschienenen Schieferflächen schnell, doch die Hinterlegung des Schiefer aus Holz als Vollschalung führte zu einem zeitlich verzögerten Übergang der Wärme auf die Luftsicht unterhalb der Vollschalung. In dem folgenden Diagramm wird der Effekt der Vollschalung deutlich. Der Kurvenverlauf der orangenen Linie zeigt die Erwärmung unterhalb der Vollschalung, auf der die Schieferplatten aufliegen. Ausgehend von einem einheitlichen Niveau der Umgebungsluft um ca.  $12^\circ\text{C}$  steigt die Temperatur unter der Holzplatte nach 90 Minuten um ca.  $11\text{ K}$ . Damit bleibt das Temperaturniveau deutlich hinter den angrenzenden Schieferflächen (vgl. hellgraue Linie), das im selben Zeitraum um  $21\text{ K}$  ansteigt.

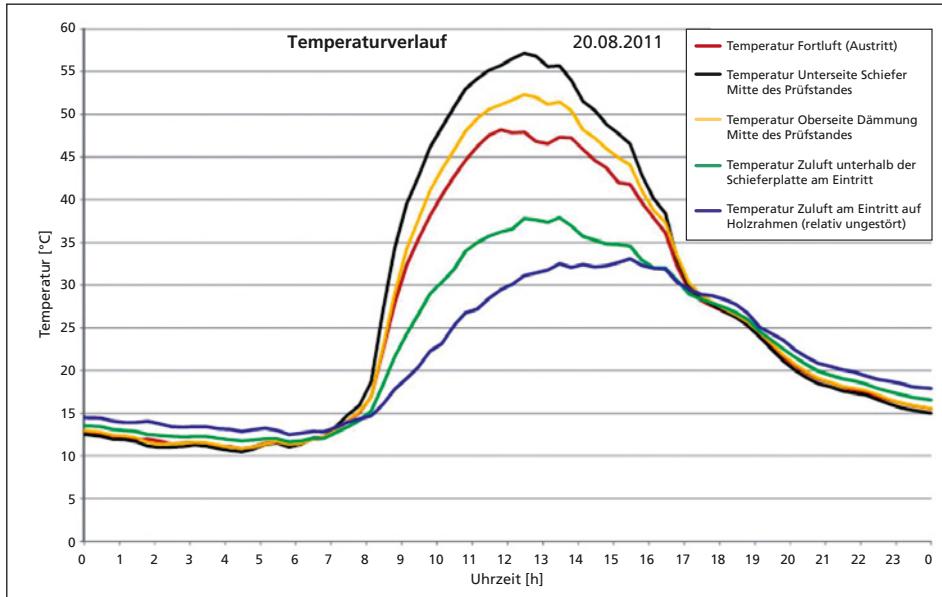
Im Abkühlvorgang nach Beendigung der Bestrahlung kehrt sich der Effekt um. Auch hier reagiert die nicht hinterlegte Schieferfläche wesentlich schneller und verliert schnell und deutlich das vorher erreichte Temperaturniveau. Dagegen verläuft die Abkühlung unterhalb der Holzschalung gedämpft durch die bauphysikalischen Eigenschaften des Holzes.

Mit dieser Untersuchung wurde deutlich, dass die übliche Verlegung von Schiefer auf einer Holzschalung nur eingeschränkt zu nutzbaren solaren Gewinnen in der Ebene der Luftsicht führt. Dagegen ist die Verlegung des Schiefer ohne Vollschalung, wie sie in Frankreich und Italien zu finden ist, besser, weil der dämpfende Einfluss der Schalung entfällt und der Wärmeübergang direkt von der Rückseite der Schieferplatte auf die Grenzschicht der Luft stattfindet. Zudem zeigte sich, dass unter den typisch deutschen klimatischen Bedingungen, die geprägt sind von einem schnellen Wechsel aus Sonne und Wolken, nur Absorber bzw. Kollektoren sinnvoll sind, die schnell reagieren und deren massebezogene Trägheit diese Effekte nicht noch reduziert.

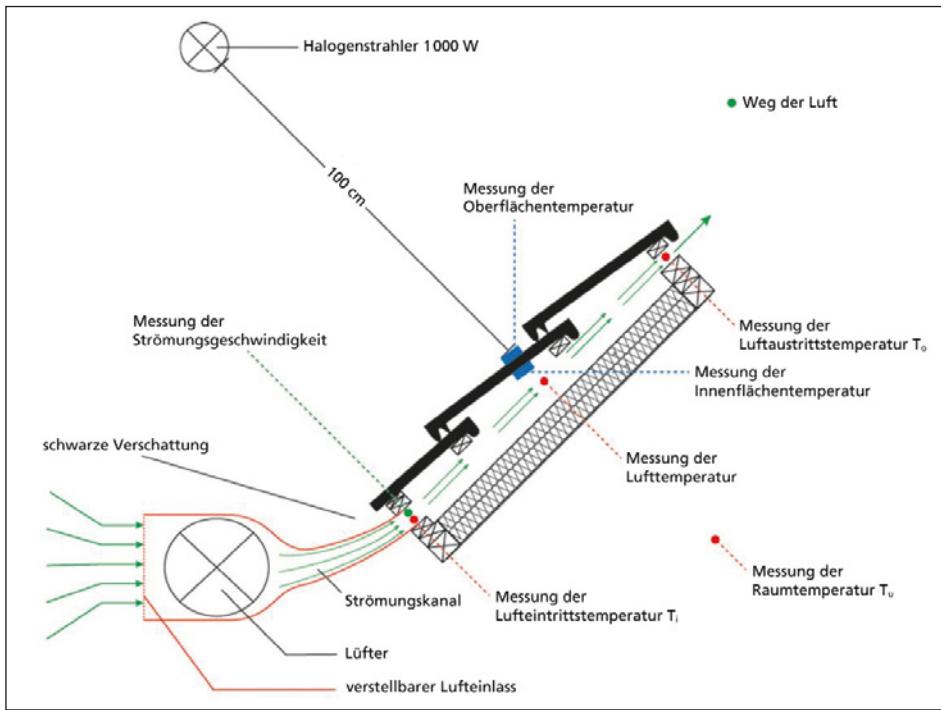
Auf dieser Untersuchung von Duzia aufbauend, folgte von Braun die Untersuchung der Erwärmungsvorgänge im Luftzwischenraum an konventionellen Dacheindeckungen mit Betondachsteinen [7]. Dabei wurde ebenfalls ein Prüfstand gleicher Größe errichtet



**Abb. 142:** Temperaturverläufe im Tagesgang am 13.10.2011. Gemessen im Prüfstand in Winningen an der Mosel. In allen Kurvenzügen zeigt sich, wie schnell wetterbedingte Veränderung Einfluss haben auf den Erwärmungsvorgang im Schieferdach-Prüfstand.



**Abb. 143:** Temperaturverläufe im Tagesgang am 20.08.2011. Gemessen im Prüfstand in Winningen an der Mosel. Alle Kurvenzüge der unterschiedlichen Messpunkte zeigen die typischen Ergebnisse an einem durchgängig sonnigen Tag. Im Zwischenraum konnte eine Temperaturzunahme der Luft von max. 17 K, am Austrittspunkt nach einem Meter Durchgang durch den Prüfstand, gemessen werden.

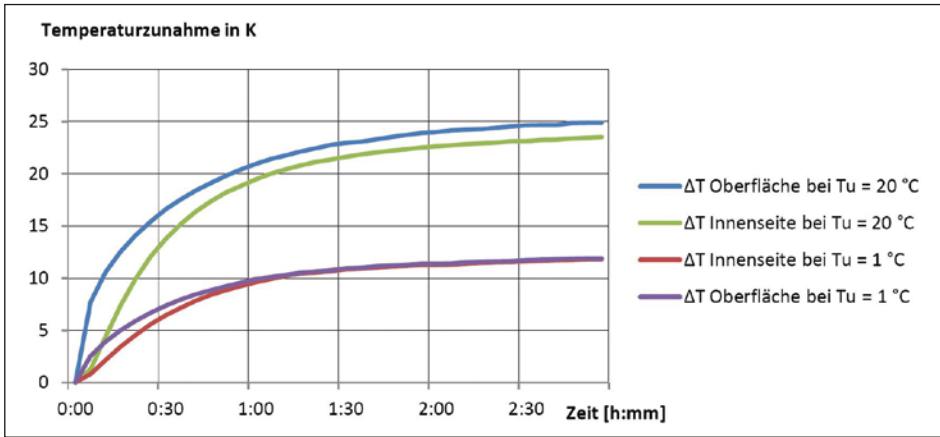


**Abb. 144:** Schemaschnitt durch den Prüfstand mit angeschlossenem Gebläse zur Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit im Luftzwischenraum

und mit Messtechnik ausgestattet. Zusätzlich wurde der Prüfstand mit einem Gebläse ausgestattet, um so eine Art von mechanischer Lüftungsanlage zu simulieren, die einem ALD entspricht, wie es z. B. bei Lüftungsanlagen im Wohnungsbau üblich ist. Zusätzlich sollte durch das Gebläse die geförderte Luftmenge optimiert werden und der Einfluss der erzwungenen Strömung auf die sich einstellenden Oberflächentemperaturen bewertet werden.

Bei der Bewertung des Absorptionsvermögens der Dacheindeckung zeigte sich, dass der Haupteinfluss in der Farbgebung des Bauteils liegt. Zu einem geringeren Teil beeinflusst auch die Rauigkeit einer Oberfläche die Eigenschaft der Absorption, da die Rauigkeit zugleich für eine vergrößerte Oberfläche steht.

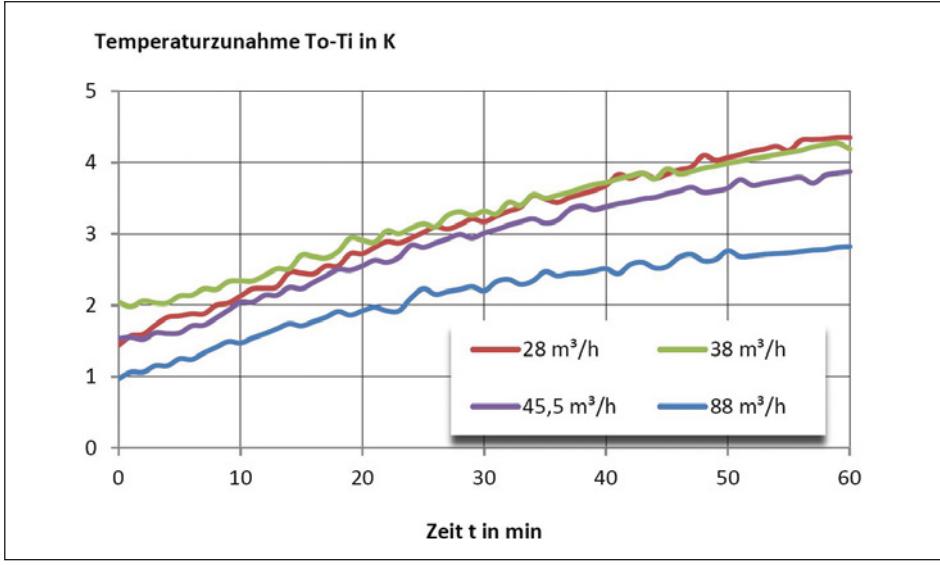
Die Untersuchungen von Braun zeigten, dass der Werkstoff des Betondachsteins wesentlich schneller auf eine einsetzende Bestrahlung reagiert, wenn bereits ein höheres Temperaturniveau der umgebenden Luft vorliegt und sich der Betonstein in einem eingeschwungenem Zustand gleicher Ausgangstemperatur befindet. Mit der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, um größere Luftmengen für die Innenraumbeheizung zu nutzen, kam es jedoch unmittelbar zu einer stärkeren Abkühlung, wie das folgende Diagramm zeigt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde deutlich, dass der wesentlichste Einfluss die Färbung der Oberfläche ist und weniger die Stoffeigenschaften, wie die Wärmeleitfähigkeit oder die Wärmespeicherkapazität. Zudem wurde deutlich, dass die Nutzung von Dachflächen als Direktabsorber möglich ist, um Luft vorzuwärmen. Allerdings zeigte



**Abb. 145:** Zunahme der Temperatur der Betonsteinober- und -unterseite bei  $200\text{ W/m}^2$  Bestrahlung mit einem Baustellenstrahler ausgehend von unterschiedlichen Ausgangstemperaturen ( $0\text{ °C}$  und  $20\text{ °C}$ ) der Umgebung

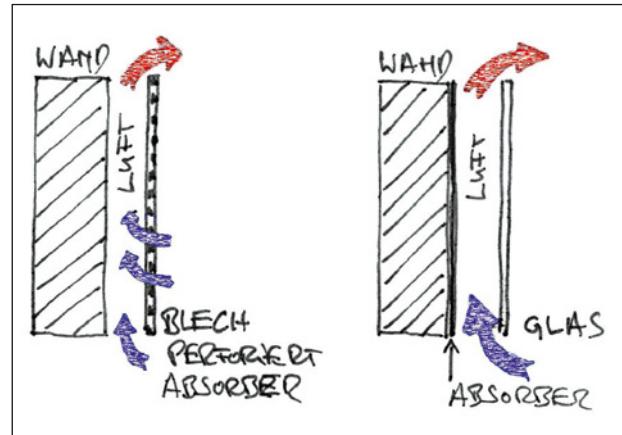
sich auch, dass eine effiziente Nutzung nicht zu erwarten ist, wenn die Bauteilflächen nur kurzzeitig beschienen werden.

Da beide Untersuchungen mit einem relativ kleinen Prüfstand durchgeführt wurden, müssen die Ergebnisse relativiert werden. Üblicherweise sind die hinterströmten Flächen in einem geneigten Kaltdach wesentlich länger. Damit kann man eine stärkere Erwärmung der anliegenden Luftschicht im Dachzwischenraum erwarten. Es muss aber auch gesehen



**Abb. 146:** Temperaturzunahme am Luftaustritt in Abhängigkeit zum Volumenstrom der Luft im Prüfstand bei einer Bestrahlungsstärke von  $200\text{ W/m}^2$  und einer Umgebungstemperatur von  $18,5\text{--}20\text{ °C}$ .

**Abb. 147:** Solarer Luftkollektor mit perforiertem Absorber als Vorhangfassade vor der wärmeübertragenden Luftsicht und solarer Luftkollektor mit Glasabdeckung vor der Luftsicht und der Absorberebene



werden, dass sich Effekte des Wärmeübergangs mit ansteigender Länge reduzieren, da sich auch die Temperaturunterschiede angleichen. Trotzdem können diese einfachen Systeme dazu beitragen den Energiebedarf zu senken, indem man die Luft vorerwärmst bevor sie von einer Lüftungsanlage in Wohn- oder Büroräume eingebracht werden. Zudem besteht mit dem einfachen Schiefer- oder Betonsteinkollektor auch die Möglichkeit solare Gewinne in Gebäuden zu nutzen, bei denen aufgrund des Denkmalschutzes der Aufbau von industriell gefertigten Kollektoren ausgeschlossen ist.

In der Anwendung findet man bereits das Wand-Kollektorensystem der kanadischen Firma Solar Wall, das auf dem gleichen einfachen physikalischen Prinzip aufbaut. Bei dem Wandkollektor werden perforierte Trapezbleche genutzt, um die Luft im Zwischenraum vorzuwärmen. Aufgrund des Materials und der Oberflächen ist der Einsatz dieser Wandpaneele für den Einsatzbereich Denkmal natürlich ausgeschlossen. Ein dunkles und perforiertes Trapezblech wird als durch- und hinterlüftete Fassade an einem massiven Bau befestigt und macht die Leckage zum System. Das dunkle Trapezblech wird als Absorber genutzt. Die Umgebungsluft gelangt über die unterseitige Zuluftöffnung und durch die Flächenperforation hinter das Trapezblech und wird dort vorerwärmst. Durch die Erwärmung der Luft über das Absorber-Trapezblech entsteht ein natürlicher Auftrieb hinter der Fassade. Unterstützt wird der Vorgang durch einen Ventilator, der einen Unterdruck auf der Fassadenrückseite erzeugt, die erwärmte Luft absaugt und über ein einbindendes Wickelfalzrohr in den Innenraum einleitet. Um in den Sommermonaten eine Überhitzung durch die Ansaugung zu warmer Luft auszuschließen, werden im oberen Bereich der Trapezblechverkleidung zusätzliche Einströmöffnungen eingebaut, die auch eine direkte Frischluftansaugung ermöglichen.

Aufgrund der einfachen baulichen Komponenten und der geringen technischen Ausstattung handelt es sich bei der Solarwall um ein günstiges System, das Luft vorerwämt und zugleich als fertige Fassade dient, ohne direkt als technische Komponente erkennbar zu sein. In Abhängigkeit der solaren Einstrahlung zu der Luftdurchströmung sind folgende Temperaturanstiege im System möglich.



**Abb. 148:** Rathaus der Stadt Erlangen mit Solarwall Fassade aus graulackierten Blechen auf der rechten Fassadenhälfte zwischen den Fenstern  
(Quelle: Seidemann Solar GmbH)

Bei einer geringen Luftdurchströmung mit  $30 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ :

- $100 \text{ W/m}^2$  ca. 7 K
- $500 \text{ W/m}^2$  ca. 18 K
- $1000 \text{ W/m}^2$  ca. 34 K

Mit einer erhöhten Luftdurchströmung  $70 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ :

- $100 \text{ W/m}^2$  ca. 5 K
- $500 \text{ W/m}^2$  ca. 13 K
- $1000 \text{ W/m}^2$  ca. 24 K

Auch anhand dieser Werte wird deutlich, dass eine langsame Strömungsgeschwindigkeit des wärmeübertagenden Mediums hinter dem Blech zu einer höheren Wärmeenergieaufnahme führt, wie es auch die Untersuchung von Braun zeigte. Allerdings ist nicht ausschließlich der maximal zu erreichende Temperaturanstieg der Luft das alleinige entscheidende Kriterium. Vielmehr ist die größere erwärmte Luftmenge, die man einem Raum zur Verfügung stellen kann, von Interesse, um hygienische Raumluftverhältnisse sicherzustellen.

## 8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Dämmmaßnahmen

### 8.1 Energieeffizienz, Energieerhalt und Energiegewinne

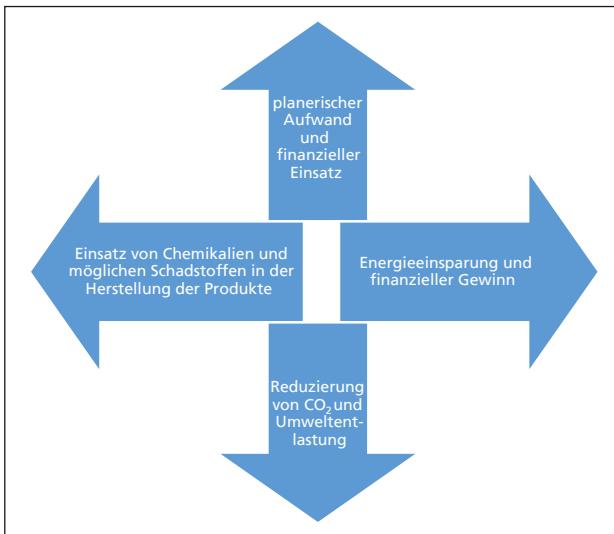
Im Zentrum aller energetischen Betrachtungen, gleich von welcher Seite aus man das Thema angeht, folgt neben der Analyse des zu betreibenden planerischen Aufwands immer die Frage nach dem Erfolg und der notwendigen Investition. Dabei wird der Einsatz von Wärmedämmstoffen in den Schichtaufbauten regelmäßig kritisch hinterfragt. In diesem Zusammenhang sind die Aspekte zur Langlebigkeit von Konstruktionen und einem geringen Wartungsaufwand sowohl aus ökonomischem, wie auch ökologischem Blickwinkel bedeutsam. Bei diesen Betrachtungen werden jedoch regelmäßig die Grundlagen für diese verwechselt. Für den Bauherrn stehen dabei die Investition und die zu erwartende Reduzierung des Energieaufwandes zum Betreiben einer Immobilie im Vordergrund. Kenngrößen, wie zum Beispiel der Primärenergiebedarf, der zum EnEV-Nachweis ermittelt wird, sind eigentlich nicht wirklich von Interesse, da die Werte zu abstrakt sind und weniger das tatsächliche Nutzerverhalten bilanziert wird. Auf der anderen Seite ist der politisch gewollte Aspekt der ganzheitlichen Bilanzierung sehr wohl von Bedeutung. Eine Betrachtung, die auch die Herkunft, den Transport und die Umwandlungsverluste berücksichtigt, bildet eben ein komplettes Bild des Energiebedarfs und der Energieeffizienz ab.

Bezüglich der zu erwartenden Einsparungen und des Gewinns beim Einsatz von Wärmedämmstoffen veröffentlichte Körner, dass der Wärmedämmstoff, der aus einem Liter Erdöl produziert werden kann und an einer Fassade eingebaut wird, über einen Einsatzzeitraum von 50 Jahren ca. 200 Liter Erdöl und damit auch 600 kg CO<sub>2</sub> reduziert.<sup>51</sup> Dem gegenüber steht jedoch ein finanzieller Aufwand zur Herstellung, der in seiner einfachsten Form als Wärmedämmverbundsystem auf EPS-Basis ca. 100 €/m<sup>2</sup> in der Herstellung und ohne Wartung kostet. Daraus resultieren Amortisationszeiten, die für einen Bauherrn immer noch als zu lang erscheinen und zudem auch noch nicht den finanziellen Aufwand für Abbruch oder Recycling berücksichtigen.

### 8.2 Wirtschaftlichkeit und Einsparpotenzial

Die Abschätzung der Verbesserung des Wärmeschutzes von Außenbauteilen im Bestand kann über die Veränderung des U-Wertes erfolgen. Für diese auf den m<sup>2</sup> Außenbauteil bezogene Abschätzung muss die Differenz des neuen U-Wertes zum vorhandenen U-Wert ermittelt werden:

<sup>51</sup> vgl. [34], S. 183



**Abb. 149:** Divergierende Interessen und Bedürfnisse mit der Auswahl der Konstruktion und gesellschaftlichen Zielen

$$\Delta U\text{-Wert} \cdot 10 \approx \text{Einsparung in l Heizöl im Jahr bzw. m}^3 \text{ Gas}^{52}$$

Dazu kann beispielhaft eine nachträglich zu dämmende Wand betrachtet werden:

Eine vorhandene Mauerwerkswand mit einem U-Wert  $2,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  wird mit 12 cm Dämmmaterial mit einer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda = 0,036 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  belegt. Der U-Wert der gedämmten Konstruktion verringert sich auf  $0,264 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Der Unterschied beträgt damit  $1,936 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

$$1,936 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot 10 = 19,36 \text{ l Heizöl bzw. m}^3 \text{ Gas pro m}^2 \text{ im Jahr.}$$

Eine weitere Grundlage liefert Häupl [44] im Lehrbuch der Bauphysik mit einer veröffentlichten Beispielrechnung, auf deren Grundlage Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit erfolgen können. Zur Bewertung der Effektivität des winterlichen Wärmeschutzes nutzt Häupl die normativ vorgegebene Länge der Heizperiode.

Anhand eines einfachen Beispiels zu einer Gebäudesanierung werden die Grundlagen aufgeführt:

1. Länge der Heizperiode 220 Tage, teilsaniertes Gebäude. Heizgrenztemperatur  $12^\circ\text{C}$ ;  $F_{GT} = 75 \text{ kKh/a}$
2. Brennwertheizung mit Endenergie-Aufwandszahl  $e = 1,2$
3. Annahme zu bestehenden Fenstern  $U\text{-Wert}_{alt} = 2,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
4.  $U\text{-Wert}_{neu}$  2-Scheibenverglasung  $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
5.  $U\text{-Wert}_{neu}$  3-Scheibenverglasung  $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

<sup>52</sup> vgl. Kosten und Wirtschaftlichkeit einzelner Maßnahmen – 52; Hrsg. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

Für 1 m<sup>2</sup> Fensterfläche ergibt sich bei einer Heizperiode von 220 Tagen ein Heizwärmebedarf für ein bestehendes Fenster:

$$Q_{h,Fenster,Bestand} = 1 \text{ m}^2 \cdot 2,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot 75 \text{ kKh/a} = \quad (100 \%)$$

Der Austausch der bestehenden Fenster führt zu folgender Veränderung des Heizwärmebedarfs je m<sup>2</sup> Fensterfläche:

$$Q_{h,Fenster,2 \text{ Scheiben}} = 1 \text{ m}^2 \cdot 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot 75 \text{ kKh/a} = 82,5 \text{ kWh/a} \quad (55 \%)$$

$$Q_{h,Fenster,3 \text{ Scheiben}} = 1 \text{ m}^2 \cdot 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \cdot 75 \text{ kKh/a} \quad (40 \%)$$

Bei einer vorhandenen Brennwertheizung mit der angesetzten Endenergie-Aufwandszahl von  $e = 1,2$  ergeben sich Heizenergiedersparungen je m<sup>2</sup> Fensterfläche im Jahr.

Ersparnis beim Einbau einer 2-Scheibenverglasung:

$$67,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \cdot 1,2 = 81 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$$

Ersparnis beim Einbau einer 3-Scheibenverglasung:

$$90,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \cdot 1,2 = 108 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$$

Die Brennstoffeinsparung beträgt bei einer Erneuerung mit einer 2-Scheiben-Verglasung ca. 81 Liter Heizöl bzw. 81 m<sup>3</sup> Erdgas. Mit einer 3-Scheiben-Verglasung wird eine zusätzliche Einsparung von ca. 25 % erreicht.

Zur Orientierung kostet der Brutto Arbeitspreis für Erdgas einer kWh bei den kommunalen Stadtwerken ca. 0,0593 € (Stand 08-2013) für Geschäftskunden bei einer Leistung des Heizgerätes zwischen 40 und 93 kW. Daraus resultiert eine Einsparung je m<sup>2</sup> neuer Fensterfläche, vorausgesetzt, die vorhandenen Fenster besitzen einen  $U_{alt,gesamt}$  von 2,0 W/(m<sup>2</sup> · K):

$$2 \text{ Scheiben} \quad 81 \text{ kWh}/\text{m}^2 \text{a} \quad \text{Einsparung ca. } 48,03 \text{ €/a}$$

$$3 \text{ Scheiben} \quad 108 \text{ kWh}/\text{m}^2 \text{a} \quad \text{Einsparung ca. } 64,04 \text{ €/a}$$

Unter der Annahme, dass ein neues Fenster ca. 1 500 €/St. kosten könnte, beträgt die Amortisationszeit ohne Berücksichtigung von Finanzierungskosten und Preissteigerungen ca. 9,7 Jahre.

Die Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit erfolgen jedoch ohne Berücksichtigung des beeinflussenden Nutzerverhaltens. Das Lüftungsverhalten der Nutzer ist letztendlich ein wesentliches Kriterium über die Effizienz einer wärmegedämmten Fensterkonstruktion. Daher können lediglich modellhaft Fenster betrachtet werden, die dauerhaft geschlossen sind.



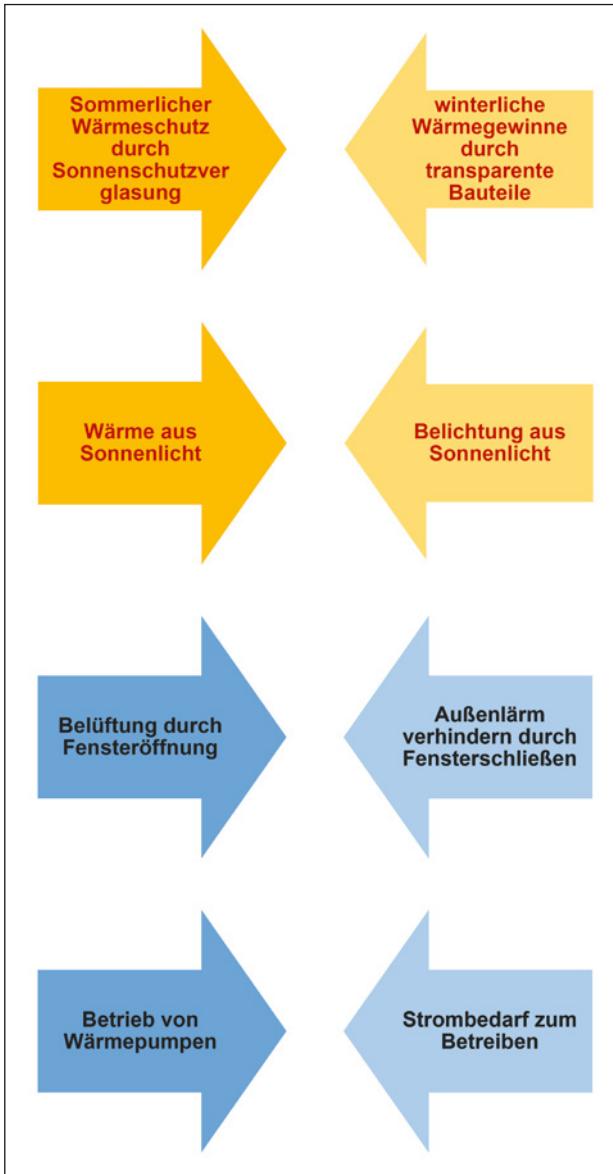
## 9 Perspektiven

Es ist fast unverständlich, dass die Nutzung von Umweltenergien immer noch nicht selbstverständlich oder zum Teil auch in Vergessenheit geraten ist. Einfache und auf die Region bezogene Möglichkeiten erneuerbare Energien zu nutzen hat es schon immer gegeben, wie die Eiskeller im Norden oder der Bädgir im Iran beispielhaft zeigen. Mit dem technischen Fortschritt scheint zugleich auch etwas an traditionellem Wissen verloren gegangen zu sein.

Die Möglichkeiten mit technischen Lösungen jeden Komfort im Hausbau konstant sicherzustellen oder Risiken zu mindern war immer attraktiv. Dies zeigt zum Beispiel auch die aktuelle Situation zum Einsatz von Lüftungsanlagen im Wohnungsbau bei Neubauten und im Sanierungsfall. Auf der Grundlage der Energieeinsparverordnung und der normativen Grundlage der DIN 1946-6 müssen für Wohnhäuser und Wohnungen Lüftungskonzepte erstellt werden, die häufig den Einsatz einer zusätzlichen Lüftungsanlage fordern. Dies ist eine Folge aus den vermehrt auftretenden Schimmelpilzbefällen in Wohngebäuden und eine Konsequenz aus den normativen Vorgaben, die Anforderungen an die Dichtheit an Gebäudehüllen zu erhöhen und Leckagen und damit den ungewollten Luftwechsel mit den damit verbundenen Energieverlusten zu unterbinden.

Der Vorteil die Energieverluste aus Konvektion durch die Leckagen zu reduzieren, wurde aufgewogen durch eine Veränderung der Qualität der Innenraumluft, die nun vollständig vom Lüftungsverhalten des Nutzers geprägt war. Der Entfall der ungeplanten Zwangsbelüftung durch nicht abgedichtete Bauwerksanschlüsse führte zu anderen Bauschäden, wie Schimmelpilzbefall als Folge unzureichender Lüftung da häufig nutzerbedingt die relative Luftfeuchte in den Wohnräumen bis in einen kritischen Bereich ansteigen konnte. Besaß das Gebäude dazu noch Wärmebrücken beziehungsweise schlecht gedämmte Anschlüsse, wurden Schimmelpilzbefälle fast vorhersehbar. Diesem Umstand folgend wurde die aktualisierte DIN 1946-6 für Lüftungsanlagen im Wohnungsbau eingeführt, die auf der Verordnungsebene mit der Energieeinsparverordnung verknüpft zu sehen ist, da die EnEV vom Planer schon immer eine dichte Gebäudehülle und Räume mit ausreichendem Luftwechsel fordert. Diese Forderung kann nicht zwangsläufig von einem Bewohner durch regelmäßige Stoßlüftung gesichert werden, daher folgte die Anforderung zur Überprüfung der neuen und sanierten Wohnräume auf der Grundlage der DIN 1946-6. Damit nahm jedoch der Grad der technologischen Lösungen eher zu. Wohnungen, sowohl im Sanierungsfall als auch im Neubau, werden seitdem regelmäßig mit unterschiedlichen Lüftungsanlagen ausgestattet. Als Folge stiegen die Investitions- und Wartungskosten erheblich. Auch der dauerhafte Energiebedarf für Lüftungsgeräte, die im Zustand der Nennlüftung permanent für die Sicherstellung des erforderlichen Luftwechsels im Betrieb sind, erhöhte sich. Das ursprüngliche Ziel des Energiesparens durch Reduzierung der Leckagen wurde damit auf den Kopf gestellt. Hinzu kommt, dass Fenster zur Erfüllung der Anforderungen weiterhin dicht in den Bauwerksanschlüssen hergestellt werden, dafür jedoch der Trend entsteht in Fensterrahmen selbst eine kontrollierte Zwangsbelüftung durch gezielte Öffnungen einzubauen.

Dieses Beispiel zeigt, wie Vorgaben und Entwicklungen zu einzelnen Problemen wiederum Schwierigkeiten in anderen Bereichen nach sich ziehen können.



**Abb. 150:** Gegensätze und Widersprüche in der Planung

Eine ähnlich diametrale Entwicklung sieht man, wenn man die Lösungen zum sommerlichen Wärmeschutz betrachtet. Mit der Auswahl des g-Wertes eines Glases und des Sonnenschutzes lassen sich die Sonneneinträge in ein Gebäude reduzieren und die Behaglichkeit für die Nutzer erhöhen. Dies erkauft man sich jedoch mit dem erhöhten Einsatz von Strom für die ausreichende Beleuchtung über den Tag.

Im Detail betrachtet wird deutlich, dass die technischen Möglichkeiten nicht immer optimal sind oder auch häufig überschätzt werden, wie man es zum Beispiel bei der

Bewertung von Wärmepumpen häufig sieht, die mit Sonnenstrom betrieben werden sollen. In einem bewölkungsreichen Land, wie Deutschland es ist, sollten die Prognosen dazu immer konservativ gewählt werden. Sind die Sonnenerträge gering, weil der Bewölkungsgrad hoch ist, muss insbesondere in den kritischen Wintermonaten Strom aus dem Netz zugekauft werden und optimistisch aufgebaute Berechnungen führen zu hohen finanziellen Defiziten.

Zum Beispiel zeigten die Untersuchungen am von der Bundesrepublik subventionierten Technologieträger »Effizienzhaus Plus« in Berlin-Charlottenburg nach zwei Jahren Bewohnzeit, dass einige Erwartungen nicht erfüllt wurden. Obwohl das Haus autark geplant war, stellte sich heraus, dass mit Photovoltaik und Wärmepumpen nicht mehr Energie erzeugt werden konnte als verbraucht wurde. Allerdings war es bei diesem hochtechnologischen Gebäude sowieso schon immer fraglich inwiefern die Ergebnisse der Untersuchungen ableitbare Ergebnisse für den einfachen Wohnungsbau liefern können.

Es ist schwer einsehbar, dass die Weiterentwicklung im Wohnbau tatsächlich im Bereich des »Effizienzhaus-Plus« zu sehen ist. Der Grad der technischen Ausstattung ist hoch und zieht einen hohen Wartungsaufwand und eine geschultes Nutzerverhalten nach sich. Zusätzlich muss gesehen werden, dass in Deutschland nicht der Neubausektor der energetische Schwachpunkt im System ist. Nur ca. 120 000 Bauanträge von Wohnimmobilien im Durchschnitt in den vergangenen drei Jahren stehen ca. 18 Millionen Bestandsimmobilien gegenüber, deren energetischer Standard weit von den heutigen Anforderungen entfernt liegt.

In vielen Bereichen besteht daher noch Entwicklungspotenzial. Trotzdem bleibt es fraglich, ob eine technische Lösung tatsächlich die richtige Antwort auf die Erfordernisse und Probleme ist. Mehr Aufklärung und ein verändertes Nutzerverhalten kann mehr erreichen als jedes technische Konzept, das erst einmal angewendet und verstanden werden muss, sowie Investitionen in der Anschaffung und Wartung nach sich zieht.

In diesem Sinne müssen eher einfachere Gebäudekonzepte für den Neubau und Sanierungen entwickelt werden. Die Einbindung regionaler Bauprodukte, die keinen erhöhten Transportbedarf nach sich ziehen, sollte ein wesentlicher Teilaspekt sein. Die Projekte des Lehmhauses Rauch in Österreich oder des Strohballenhauses der Architektin Maini in Katalonien weisen in diese Richtung. Ebenso kann aber auch der Umgang mit den klimatischen Bedingungen von Bedeutung sein und entwurfsentscheidend werden, wie es das Projekt der Architekten Martin/Abarca in Andalusien zeigt. Allen Projekten ist jedoch offensichtlich gemeinsam, dass vorab eine Analyse der besonderen lokalen Gegebenheiten erfolgte, die dann prägend für die Projekte wurde. Ebenso deutet auch das Projekt »2226« von Baumschlager Eberle in diese Richtung. Auch wenn hier ebenfalls Monitoring-Instrumente und Steuerungen genutzt werden, um die Bedingungen der Behaglichkeit für die Nutzer sicherzustellen, geschieht dies auf der Grundlage eines einfachen Konzeptes, das ein empirisches Wissen um die Materialien und Bauteile nutzt und bauphysikalisch, energetisch einbindet und auch im Sinne der Nachhaltigkeit auf eine klassische Ausführung der Wandkonstruktion zurückgeht. Dabei wird auf schwer recycelbare Verbundkonstruktionen bewusst verzichtet.

Es sollte eben in der Gebäudeplanung nicht, wie es bereits Lucius Burckhardt formulierte, darum gehen, die Installationsgewerke zu bereichern, sondern Energieverluste durch bauliche Maßnahmen zu minimieren und Energiegewinne zu maximieren.



# 10 Anhang

## Literaturverzeichnis

- [1] Akbari Hashem; Opportunities for saving energy and improving air quality in urban heat islands veröffentlicht in »advances in passive cooling«, James and James (Science Publishers) Ltd.; London 2007; S. 44
- [2] Baehr, Hans Dieter; Stephan, Karl: Wärme- und Stoffübertragung. 8. aktualis. Aufl. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2013
- [3] Benevolo, Leonardo: La Storia della città (Originaltitel). 6. Aufl., Übersetzung: Humburg, Jürgen: Die Geschichte der Stadt. Frankfurt am Main: Campus Verlag, 1982
- [4] Bobran, Hans W.; Bobran-Wittfoht, Ingrid: Handbuch der Bauphysik. Schallschutz – Raumakustik – Wärmeschutz – Feuchteschutz. 8., überarb. u. erw. Aufl. Köln: R. Müller, 2010
- [5] Bohne, Dirk: Ökologische Gebäudetechnik. Stuttgart: Kohlhammer, 2004
- [6] Bonk, Michael; Anders, Frank: Schäden durch mangelhaften Wärmeschutz. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2. überarb. u. erw. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2012
- [7] Braun, Felix: Bewertung der Erwärmungsvorgänge unterschiedlicher Kaltdachkonstruktionen. MSc Thesis: Bergische Universität Wuppertal, 2013
- [8] Burckhardt, Lucius in »Werk und Zeit«; veröffentlicht in »Die Kinder fressen ihre Revolution«, Hrsg. Bazon Brock; Köln: DuMont Buchverlag, 1985
- [9] Duzia, Thomas; Bogusch, Norbert: Basiswissen Bauphysik. Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes. 2., aktualis. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2014
- [10] Duzia, Thomas: Solarthermie im Denkmalschutz – Beitrag und Untersuchung von Schieferdächern als Direktabsorber. Technologische, bauphysikalische und architektonische Konsequenzen. Techn. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal: 2013; Stuttgart: IRB Fraunhofer Verlag, 2013
- [11] Fouad, Nabil A.; Richter, Torsten: Leitfaden Thermografie im Bauwesen – Theorie, Anwendungsbeispiele, praktische Umsetzung. 4., überarb. u. erw. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2012
- [12] Frank, Walther: Raumklima und Thermische Behaglichkeit. Berlin/West: Ernst & Sohn, 1975 (Berichte aus der Bauforschung; 104)
- [13] Gassel, Andreas: Beiträge zur Berechnung solarthermischer und energieeffizienter Energiesysteme. Dissertation: TU Dresden, 1997
- [14] Gertis, Karl: Die Erwärmung von Räumen infolge Sonneneinstrahlung durch Fenster. In: Sonneninstrahlung – Fenster – Raumklima. Stuttgart, 1970 (Veröffentlichungen aus dem Institut für Technische Physik Stuttgart; 65)
- [15] Glück, Bernd: Vorschlag zur verbesserten Darstellung und Messung der operativen Raumlufttemperatur. Gesundheits-Ingenieur – Haustechnik, Bauphysik, Umwelttechnik 127 (2006), Nr. 2, S.76–82
- [16] Hauser, Gerd: Die Wirkung der Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen. Bauphysik 22 (2000), Nr. 5, S. 308–312
- [17] Heimke, Wilfried: Naturwissenschaftliches Grundwissen für Ingenieure des Bauwesens. Bd. 2. Physik im Bauwesen. 2., überarb. u. erw. Aufl. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1992
- [18] Homann, Martin: Porenbeton Handbuch. Bundesverband Porenbeton. Bauverlag Gütersloh, 6. Auflage 2008, S.88
- [19] Hochschule Luzern Technik & Architektur; Wohnhaus Rauch – Lehmhaus; Studie bezüglich Grauer Energie, Heizenergie und Komfort bei einem Lehmhaus

- [20] Hottgenroth Software (Hrsg.): Psi-Therm Handbuch – Software zur Wärmebrückeberechnung. Köln, 2011
- [21] Imessad, K.; Ait Messaoudene, N.; Belhamel, M.: Performances of the Barra-Costantini passive heating system under Algerian climate conditions. Elsevier – Renewable Energy 29 (2004), no. 3, p. 357 – 367
- [22] Kaltschmitt, Martin; Wiese, Andreas; Streicher, Wolfgang (Hrsg.): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 3., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 2003
- [23] Kasser Ueli, Preisig Hansruedi, Wydler Judith: Unsichtbarer Energieverbrauch, tec21, Nr. 27/28, Juli 2001
- [24] Körner, Klaus W.: Wärmeschutz ist Klimaschutz – das magische Dreieck von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft. In: Maas, Anton (Hrsg.): Umweltbewusstes Bauen. Energieeffizienz – Behaglichkeit – Materialien. Festschrift zum 60. Geburtstag von G. Hauser. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008
- [25] Künzel, Helmut: Bauphysik und Raumklima. Entwicklung in der Vergangenheit. Wksb 51 (2006), Nr. 57, S. 3 – 8
- [26] Lamprecht, Heinz-Otto: Opus Caementitium. Bautechnik der Römer. 5. Aufl. Düsseldorf: Beton-Verlag, 1996
- [27] Lander, Helmut; Niermann, Manfred: Lehm-Architektur in Spanien und Afrika. Königstein im Taunus: Langewiesche, 1980
- [28] Leusden, Pels; Freymark: Darstellungen der Raumbehaglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch. Gesundheitsingenieur 72 (1951), Nr. 16
- [29] Liljequist, Gösta H.: Meteorologi (Originaltitel). Generalstabens Litografiska Anstalt: Stockholm, 1962, autorisierte Übersetzung und Bearbeitung: Cehak, Konrad: Allgemeine Meteorologie. 3. überarb. und erw. Aufl. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 1984
- [30] Pfoser, Nicole (Hrsg.): Gebäude Begrünung Energie. Kurzbericht, TU Darmstadt, 2013
- [31] Pilz, Achim (Hrsg.): Lehm im Innenraum. Eigenschaften, Systeme, Gestaltung. 2., erw. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2012
- [32] Preisig, Hansruedi: Massiv- oder Leichtbauweise? – Trends im Passivhausbau, Sonderdruck aus Heft 42/2002, SIA tec21
- [33] Recknagel, Hermann; Sprenger, Eberhard; Schramek, Ernst-Rudolf (Hrsg.): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 09/10 einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik. 74. Aufl. München: Oldenbourg Industrieverlag, 2009
- [34] Reuscher, Günter et al.: Mehr Wohlstand – weniger Ressourcen. In: Zukünftige Technologien Consulting Nr. 94, Düsseldorf: VDI, 2012
- [35] Sabady, Pierre: Haus & Sonnenkraft; Wissensgrundlage für Solar-Bautechnik. 3., erw. Aufl. Zürich: Helion-Verlag, 1977
- [36] Schild, Kai; Willems, Wolfgang M.: Wärmeschutz. Grundlagen – Berechnung – Bewertung. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2011
- [37] Schroeder, Horst; Lehmbau zitiert aus: Dachverband Lehm e. V. (Hrsg.); Lehmab Regeln – Begriffe, Baustoffe, Bauteile
- [38] Siebel, Andreas: Effiziente Anheizung von Gebäuden in massiver Bauweise bei intermittierender Beheizung. Technische Universität Dortmund, 2013
- [39] Tuckermann, Rudolf: Strahlungsprozesse in der Atmosphäre. Atmosphärenchemie. Technische Universität Braunschweig: Institut für Physikalische und Theoretische Chemie, 2005
- [40] Wagner, Andreas: Energieeffiziente Fenster und Verglasungen. 4., vollst. überarb. Aufl. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2010
- [41] Werner, H.: Dunkle Wandoberflächen – Ihr Einfluss auf den Wärmeverlust. IBP Mitteilung 13 (1986) Nr. 110

- [42] Willems, M. Wolfgang et. al.: Lehrbuch der Bauphysik. 7., vollst. überarb. und aktualis. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- [43] Wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V. (Hrsg.): Innendämmung nach WTA I – Planungsleitfaden. Stuttgart: 05.2009/D (Merkblatt 6-4). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2009
- [44] Häupl, P.: Lehrbuch zur Bauphysik. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013

## Normenverzeichnis

DIN EN 410:2011-04. Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen; Deutsche Fassung EN 410:2011

DIN 1986-100:2008-05. Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056

DIN V 4106-6. Anhang A

DIN 4108-2:2013-02. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

DIN 4108-3:2014-11. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung

DIN 4108-4:2013-02. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2013

DIN 4108 Beiblatt 2:2006-03. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele

DIN 4710:2003-01. Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland

DIN 55634:2010-04. Beschichtungsstoffe und Überzüge – Korrosionsschutz von tragenden dünnwandigen Bauteilen aus Stahl

DIN EN ISO 12631:2013-01. Wärmetechnisches Verhalten von Vorhangsfassaden – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten (ISO 12631:2012); Deutsche Fassung EN ISO 12631:2012

DIN EN 14501:2006-02. Abschlüsse – thermischer und visueller Komfort – Leistungsanforderungen und Klassifizierung; Deutsche Fassung EN 14501:2005

DIN EN ISO 6946:2008-04. Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2007

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 (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005

DIN EN ISO 10077-2:2012-06. Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen (ISO 10077-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 10077-2:2012

DIN EN ISO 10211:2008-04. Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen (ISO 10211:2007); Deutsche Fassung EN ISO 10211:2007

DIN EN ISO 15265:2004-11. Ergonomie der thermischen Umgebung Strategie zur Risikobeurteilung zur Abwendung von Stress oder Unbehagen unter thermischen Arbeitsbedingungen (ISO 15265:2004); Deutsche Fassung EN ISO 15265:2004

DIN EN ISO 13788:2013-05. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren (ISO 13788:2012); Deutsche Fassung EN ISO 13788:2012

VDI 3789 Blatt 2:2001-10. Umweltmeteorologie Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Oberflächen, Berechnung der spektralen Bestrahlungsstärken im solaren Wellenlängenbereich

## Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Der Endenergieverbrauch in privaten Haushalten in Deutschland in 2012 ohne KFZ-Nutzung (Quellen der Berechnung: BDEW: AGEB, RWI, DIW, abgerufen am 12.05.2015)
- Abb. 2: Einflussfaktoren auf die energieoptimierte Gebäudeplanung
- Abb. 3: Zeitungsanzeige des Climax Solar-Water Heater (Quelle: John Perlin, University of California)
- Abb. 4: Südansicht des Solar Hemicycle House (Jacob II House) von Frank Lloyd Wright in Middleton/Wisconsin, Courtesy of National Historic Landmarks Program, National Park Service (Quelle: Thomas Yanul)
- Abb. 5: Ansicht der geschlossenen und in den Erdhügel eingelassenen Nordseite des Solar Hemicycle House, Courtesy of National Historic Landmarks Program, National Park Service (Quelle: Thomas Yanul)
- Abb. 6: Funktionsprinzip des Solar Hemicycle House von Frank Lloyd Wright
- Abb. 7: Wärmestromsimulation des Solar Hemicycle House von Frank Lloyd Wright unter stationären Bedingungen
- Abb. 8: Systemskizze des 1949 von Jean Prouvé geplanten Maison tropicale mit seiner zweischaligen Trennung von Zelle und sonnenbeschienener Dachhaut, die die Zelle verschattet und zugleich zu einem kühlenden Kamineffekt führt.
- Abb. 9: Schematische Darstellung der gegenläufigen Jahresgänge von Strahlungsangebot zum häuslichen Endenergiebedarf zur Abnahme von Wärme
- Abb. 10: Aspekte der nachhaltigen Gebäudeplanung
- Abb. 11: Blick über den Patio de los Arrayanes in der Alhambra in Granada
- Abb. 12: Arkaden in Bologna, die das Erdgeschoß vor der direkten Sonnenbestrahlung schützen
- Abb. 13: Gegenüberstellung der Wirkungsweise eines Patios. Während der Nacht bildet sich im Inneren ein Kaltluftsee. Durch die Modellierung der angrenzenden Bauwerksvolumen wird die Erwärmung des Kaltluftsees relativ lange verzögert. Erst mit der einsetzenden direkten Bestrahlung beginnt die Erwärmung der tangierenden Bauteilflächen und somit auch des angrenzenden Luftvolumens.
- Abb. 14: Schematischer Schnitt durch den Patio de los Arrayanes und den Torre de Comares in der Alhambra. Im Zentrum des Patios liegt ein heckengesäumtes Wasserbecken. Durch die Dichteunterschiede ergibt sich eine Thermik im Torre de Comares, was dazu führt, dass kühlere Luft aus dem Patio nachströmt.
- Abb. 15: Eingang zu einer ehemaligen Höhlenwohnung im Barrio Sacromonte in Granada, Museo del Sacromonte, Granada (Quelle: Museo del Sacromonte, Granada)
- Abb. 16: Innenansicht des Wohnraums in einer Höhlenwohnung in Granada (Quelle: Museo del Sacromonte, Granada)
- Abb. 17: Schnitt durch das Auditorium der Stadt Puente Genil
- Abb. 18: Wettbewerbsentwurf für das Auditorium der Stadt Puente Genil der Architekten Carlos Martín González & Fco. Javier Abarca Álvarez, Erster Preis Realisierungs-Wettbewerb »Salón de Exposiciones en Puente Genil Córdoba, España« Abarca Álvarez; Granada, Spanien.
- Abb. 19: Der Bādgir von Dowlatabad in Yazd (Quelle: 22 MSE-Ing. Architektin)
- Abb. 20: Blick über die im Wüstengebiet gelegene Stadt Yazd im Iran (Quelle: Roya Faghaninia MSE-Ing. Architektin)
- Abb. 21: Schematische Funktionsweise eines Bādgir bei Nacht und Tag. In der Nacht kühlte die einströmende Außenluft die Masse der Konstruktion.
- Abb. 22: Funktionsweise der Kühlung über Quantate über eine horizontale Freispiegelbrunnenleitung. Über vertikale Schächte strömt Außenluft nach und kühlte im Erdreich und über dem Wasserspiegel ab.

- Abb. 23: Denkmalgeschütztes Bauernhaus in Höfen/Eifel mit Schutzhecken auf der windzugewandten Wetterseite des Gebäudes.
- Abb. 24: Auszug aus der Beschaffungsliste für das Eis des städtischen Eiskellers der Stadt Barmen (heute: Wuppertal) (Quelle: Stadtarchiv Wuppertal – Sonderakte der Stadt Barmen 1867–1868 (Akte: G I 34))
- Abb. 25: Schematischer Aufbau eines Eiskellers mit der Gebäudeaußenhülle und Eingangsschleuse
- Abb. 26: Anhaltswerte der Umweltwärmequellen Luft, Grundwasser, Oberflächenwasser und Erdreich im Jahresgang nach VDI 2067-6:1989-09 (Quelle: [33], S. 494)
- Abb. 27: Jahresgang der mittleren Globalstrahlung unterschiedlicher Orte (Quelle: DIN 4710:2003-01 Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland, Tab. 8.2, S. 160)
- Abb. 28: Beispieldiagramm der Häufigkeit von heiteren, bewölkten und bedeckten Tagen als Mittelwerte der Jahre von 1961 bis 1990 (Quelle: DIN 4701:2003-01; Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland, Tab. 6, S. 113).
- Abb. 29: Schematische Darstellung der auf ein Bauteil auftreffenden Gesamtstrahlung und den daraus resultierenden Wärmeströmen aus der Strahlungsaufteilung
- Abb. 30: Mittlere Sonnenscheindauer an unterschiedlichen Standorten (Quelle: DIN 4710:2003-01 Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland, Tab. 8.2, S. 160)
- Abb. 31: Globalstrahlungskarte für Deutschland nach PVGIS mit dem jährlichen Strahlungsangebot bei optimal ausgerichteten Photovoltaikmodulen (Quelle: European Communities, 2001–2008, Šuri M., Huld T., Dunlop E. D., Ossenbrink H. A., 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. Solar Energy, 81, 1295–1305, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>).
- Abb. 32: Mittlere Windgeschwindigkeiten ohne Windstille (Kalmen) in ausgewählten Orten (Quelle: DIN 4710:2003-01 Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland)
- Abb. 33: Windanfall und Verwirbelungen an einem Gebäude
- Abb. 34: Heizenergiebedarf in Abhängigkeit von den lokalklimatischen Verhältnissen (Quelle: Grauthoff, M.; Mook, V.: Integrierte Planungsinstrumente für solaren Städtebau in Building a New Century – 5th European Conference Solar Energy in Architecture and Urban Planning (Eurosolar-Verlag, Bonn), 1999)
- Abb. 35: Sonnengang im Jahresgang mit dem Höchststand im Sommer und dem Tiefstand im Winter
- Abb. 36: Sonnenhöhe  $h$  im Jahresgang um 12 h und 15 h für 50° nördlicher Breite (Quelle: [33], CD 14, Bild 1.1.4-4)
- Abb. 37: zeichnerische Überprüfung der direkten Sonneneinstrahlung am Mittag bei unterschiedlichen Sonnenständen im Jahresverlauf (Quelle: Architekten Traverso-Vighy mit Universität Padua, vgl. Kapitel 6.1)
- Abb. 38: Gesamtstrahlungsleistung je  $m^2$  Fläche im Tagesgang auf Wänden verschiedener Ausrichtungen im Juli für 50° nördlicher Breite. Gesamtstrahlung bei einem Trübungsfaktor nach Linke von  $TL = 4,3$  (geringe Trübung) (Quelle: [33], CD 14, Bild 1.1.4-7)
- Abb. 39: Mittelwerte des Wasserdampfgehalts in g/kg trockener Luft an heiteren Tagen im Jahresgang (Quelle: DIN 4710)
- Abb. 40: Mittelwerte des Wasserdampfgehalts in g/kg trockener Luft an bedeckten Tagen im Jahresgang nach DIN 4710 (Quelle: DIN 4710:2003-01; Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland, Tabellen 5 – Tagesgänge des Wasserdampfgehalts)

- Abb. 41: Einwirkung der Globalstrahlung auf vertikal ausgerichtete Ost-, Süd-, West- und Nordflächen als Tagesverlauf im Juni als Mittelwerte aus den Jahren 1963–1972 für Zürich-Kloten. Kurvenzüge für 1 % aller ermittelten Strahlungszustände unter optimalen Bedingungen. Gestrichelt sind die Werte der Globalstrahlung unter 50 % der Summenhäufigkeit für die einzelnen Teilflächen dargestellt (Quelle: [35], S. 95).
- Abb. 42: Einwirkung der Globalstrahlung auf vertikal ausgerichtete Ost-, Süd-, West- und Nordflächen als Tagesverlauf im Dezember als Mittelwerte aus den Jahren 1963–1972 für Zürich-Kloten. Kurvenzüge für 1 % aller ermittelten Strahlungszustände unter optimalen Bedingungen. Gestrichelt sind die Werte der Globalstrahlung unter 50 % der Summenhäufigkeit für die einzelnen Teilflächen dargestellt (Quelle: [35], S. 95).
- Abb. 43: Der Azimutwinkel  $\beta$  beschreibt die Abweichung der strahlungsempfangenen Fläche zur Ausrichtung nach Süden. Die Abweichung geht von  $+45^\circ$  bis  $-45^\circ$ .
- Abb. 44: Arten der Geothermie
- Abb. 45: Ungefährer Verlauf der Lufttemperatur des ungestörten Erdreichs und des Erdreichs mit Wärmeentzug in ca. 1,50 m Tiefe im Jahresgang. (Quelle: [33], S. 496)
- Abb. 46: Jahresgang der Temperaturen im Erdreich in Potsdam nach DIN 4710. Bis 1 m Tiefe besteht das Erdreich aus sandigem Lehm. Ab 2 m wechselt die Zusammensetzung des Erdreichs auf kiesigen Sand. Die tabellierten Werte stammen aus einem Bereich, der im Winter ständig schneefrei gehalten wurde. (Quelle: DIN 4710:2003-01; Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland)
- Abb. 47: Jahresgang der Temperaturen im Erdreich aus lehmigen Schluff in Essen nach DIN 4710. (Quelle: DIN 4710:2003-01; Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland, Auszüge aus den Tab. 11.4 und 11.5, S. 186)
- Abb. 48: Behaglichkeitsfaktoren
- Abb. 49: Behaglichkeitsfeld für den einfachen praktischen Gebrauch (Quelle: [28])
- Abb. 50: Anteile der Wärmestrahlung an Wandoberflächen
- Abb. 51: Behaglichkeitsfeld (Quelle: [12])
- Abb. 52: Faktoren der Gebäude-Lebenszyklusbetrachtung eines Gebäudes mit allen seinen Teilen
- Abb. 53: Modellvorstellung eines Schwarzen Strahlers, der im Strahlungsaustausch mit der Umwelt steht. In dem Körper liegt eine absolute bzw. konstante Temperatur vor.
- Abb. 54: Emissionsgrade von verschiedenen Stoffen (Quelle: [11])
- Abb. 55: Die Erwärmung von Räumen infolge Sonneneinstrahlung durch Fenster (Quelle: [14])
- Abb. 56: Vereinfachte Darstellung üblicher Wandkonstruktionen mit Temperaturverläufen in den Bauteilschichten
- Abb. 57: Vereinfachte Darstellung der Temperaturamplitudendämpfung. Nach dem Auftreffen der Gesamtstrahlung erfolgt mit dem Wärmestrom eine Dämpfung, die aus den Verlusten im Inneren des Bauteils durch Querwärmeströme erfolgen und dem zeitlichen Verlauf.
- Abb. 58: Erwärmungsverlauf einer verputzten Bims-Hohldielenwand an einem strahlungsreichen Sommertag (Quelle: [4], Abb. 85, S. 123)
- Abb. 59: Systemschnitt der Solarabsorberkonstruktion nach Barra-Costantini
- Abb. 60: Schema der Strömungsbedingungen in einem Gebäude mit einer Trombe-Wand unter sommerlichen und winterlichen Bedingungen
- Abb. 61: Passive Sonnenenergienutzung bei Sonneneinstrahlung und die daraus resultierende Temperaturerhöhung in gleichen Räumen unterschiedlicher Bauart (Quelle: [9] S. 178 und [18])
- Abb. 62: Verlegtes Rohrnetz einer Betonkernaktivierung auf der unteren Bewehrungslage einer Deckenplatte (im Durchstanzbereich der Innenstützen sind die Rohrnetze aus konstruktiven Gründen nicht verlegt) (Quelle: Museum für Naturkunde Berlin, Carola Radke)

- Abb. 63: Grafische Gegenüberstellung der Herstellungskosten (inkl. 19 % MwSt.) bezogen auf 1 m<sup>2</sup>-Nutzfläche für einen mögliche Ausführungsvariante einer Bürogebäude-Klimatisierung (Systemvarianten nach Tabelle 11)
- Abb. 64: Grafische Gegenüberstellung der jährlichen Betriebskosten (inkl. 19 % MwSt.) bezogen auf 1 m<sup>2</sup>-Nutzfläche für eine mögliche Ausführungsvariante einer Bürogebäude-Klimatisierung (Systemvarianten nach Tabelle 11)
- Abb. 65: Schematische Wirkungsweise der Betonkernaktivierung für den Heiz- und Kühl-Fall. In beiden Fällen wird die Gebäudemasse zur Regulierung genutzt.
- Abb. 66: Auswirkungen einer verminderten Bauteiloberflächentemperatur auf den Feuchtegehalt bei einer raumseitigen Lufttemperatur von 20°C.
- Abb. 67: Winteranwendung: Nutzung der thermischen Bauteilaktivierung von Deckenplatten bei solarer Einstrahlung tagsüber (links) und in der Nachtnutzung (rechts)
- Abb. 68: Sommeranwendung: Nutzung der thermischen Bauteilaktivierung von Deckenplatten bei solarer Einstrahlung (links) und in der Nachtnutzung (rechts)
- Abb. 69: Aufbau und Wirkungsweise eines Energiepfahls
- Abb. 70: Saisonaler Verlauf der Temperaturinteraktion zwischen Pfählen und Boden
- Abb. 71: Einsatz von römischem Leichtbeton gestaffelt über die Höhe mit abnehmender Rohdichte im neuerrichteten Pantheon in Rom (Quelle: [26], S. 208)
- Abb. 72: Mögliche Ausführungsvarianten von Gebäudeaußenwänden mit Leichtbeton im Vergleich zu konventionellen Ausführungen mit einer Trennung von Dämm- und Tragkonstruktion
- Abb. 73: Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Porenleichtbeton in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte (Quelle: HeidelbergCement)
- Abb. 74: Aufgeschäumter Glasschotter als Dämmstoff und Zuschlagstoff für Leichtbetone
- Abb. 75: Betonage des Dachs von Haus 36 (MBA/S, Stuttgart)
- Abb. 76: Schalung der Dachkonstruktion mit Lichtausschnitten von Haus 36 (MBA/S, Stuttgart)
- Abb. 77: Nordwest-Ansicht von Haus 36 (MBA/S, Stuttgart)
- Abb. 78: Anschlussdetail Dämmbeton – Fenster mit 3-fach Isolierverglasung (Haus 36, MBA/S, Stuttgart)
- Abb. 79: Gebäudeaußenhülle von Haus 36 im Vertikalschnitt (MBA/S, Stuttgart)
- Abb. 80: Graue Energie, Anteil der Primärenergieaufwendung in der Gesamtlebensdauer
- Abb. 81: Graue Energie in den Bauteilen (Quelle: WTA)
- Abb. 82: Graue Energie von Passivhäusern in Leicht- und Massivbauweise: kompakte und nicht kompakte Gebäudevolumen im Vergleich (Quelle: Hansruedi Preisig: Massiv- oder Leichtbauweise? – Trends im Passivhausbau, Sonderdruck aus Heft 42/2002, SIA tec21)
- Abb. 83: Seitenansicht Wohnhaus Rauch (Quelle: Boltshauser Architekten AG/Zürich, Beat Bühler)
- Abb. 84: Axonometrie Obergeschoss (Quelle: Boltshauser Architekten AG/Zürich)
- Abb. 85: Schnitt durch das Wohnhaus Rauch (Quelle: Boltshauser Architekten AG/Zürich)
- Abb. 86: Wochenverlauf im Sommer der Lufttemperatur in den Innenräumen des Erdgeschoßes auf der Grundlage von rechnergestützten Simulationen. (Quelle: Hochschule Luzern Technik & Architektur; Wohnhaus Rauch – Lehmhaus; Studie bezüglich Grauer Energie, Heizenergie und Komfort bei einem Lehmhaus, S. 22)
- Abb. 87: Innenansicht des Übergangs zum Treppenraum (Quelle: Boltshauser Architekten AG/Zürich)
- Abb. 88: Schnitt durch den »monolithischen« Wandaufbau aus Stampflehm, Schlammziegeln als Erosionsschutz und der Innendämmung aus Schilf des Wohnhauses Rauch (Quelle: Boltshauser Architekten AG/Zürich)
- Abb. 89: Schichtaufbau einer Strohballenwand mit mehreren Lagen an Lehmputz und Jutegewebe-einlage

- Abb. 90: Ansicht der Casa Vallgorguina in der Bauphase
- Abb. 91: Ansicht Casa Vallgorguina nach der Fertigstellung 2008
- Abb. 92: Simulationen zur Entwicklung der Temperaturen über zwei Tage im Januar (links) und August (rechts). Jeweils hellblau die Außentemperatur, dunkelblau die InnenTemperatur der Luft und rot die raumseitige Temperatur der Wandoberfläche.
- Abb. 93: Grundriss der Wohnebene im Obergeschoß mit ca. 40 cm starken Außenwänden.
- Abb. 94: Temperaturschichtung und kühlende Effekte durch Masse im Dachbereich und zu den erdbenötigten Bauteilen im Gebäude und Luftströmung unter sommerlichen Bedingungen zum 21. Juni.
- Abb. 95: Einflüsse auf den sommerlichen Wärmeeintrag in einem Gebäude bzw. in einem Raum
- Abb. 96: Klimaanlagen (Splitgeräte) in China (Quelle: Yanbin Xiao)
- Abb. 97: Betriebskosten im Vergleich, dargestellt sind die Minimal- und Maximalwerte (Quelle: BMVBS (Hrsg.): Leitfaden Nachhaltiges Bauen
- Abb. 98: Prozentualer Anteil der einzelnen Faktoren am Einflusspotenzial für den sommerlichen Wärmeschutz (Quelle: Gebäudehülle Schweiz. Verband Schweizer Gebäudehüllen-Unternehmungen – Technische Kommission Energie (Copyright: Martin H. Spitzner/IVPU))
- Abb. 99: Das tvzeb-Gebäude in Vicenza/Italien. Ansicht der Südfront vor dem offenen Innenbereich im Untergeschoß mit einem zusätzlichen Außenliegenden Sonnenschutz
- Abb. 100: Simulationen zum Einfluss der direkten Sonnenbestrahlung auf die Ausleuchtung des Innenraums unter jahreszeitlicher Veränderung
- Abb. 101: Jahresgang der offenen Raumzone der Raumlufttemperatur (gelb) und der RADIANT Temperatur
- Abb. 102: Jahresgang des Heizwärmebedarfs (blau) und des Kühlenergiebedarfs (gelb), dargestellt über ca. 8640 Stunden
- Abb. 103: Emission, Reflexion und Transmission (Quelle: [11], S. 15)
- Abb. 104: Strahlung von Glas in Abhängigkeit der Wellenlänge (Quelle: [11], S. 27)
- Abb. 105: Entstehung des Treibhauseffekts durch den infraroten Anteil der Strahlung, die die Glasscheibe durchtritt, während der langwellige Anteil der Strahlung reflektiert wird.
- Abb. 106: Beispielhafte Darstellung der Aufteilung einer Strahlungsleistung an Verglasungen
- Abb. 107: Glasfärbungen bei unterschiedlich starke Sonnenschutzverglasung mit einem niedrigen g-Wert
- Abb. 108: Schnittzeichnung der Sonnenstandssimulation für das Wohn- und Bürogebäude (Quelle: Traverso-Vighy)
- Abb. 109: Hochhaus an der Avenida Diagonal in Barcelona (TAC Arquitectes, Barcelona)
- Abb. 110: Detailschnitt der geneigten Fensterkonstruktion mit der blechverkleideten Brüstung
- Abb. 111: Die Sommer- und Wintersonnenstände von Barcelona bezogen auf die Fassade des Hochhauses an der Avenida Diagonal in Bezug zur Schräglage der südorientierten Glastafeln.
- Abb. 112: Berechnung der anzusetzenden Raumflächen bei Begrenzung der Raumtiefe für den sommerlichen Wärmeschutznachweis
- Abb. 113: Spezifische Wärmespeicherfähigkeit und Rohdichten ausgewählter (Bau-)Stoffe im Vergleich
- Abb. 114: Außenliegender Sonnenschutz – fassadenbündig integriert mit einem  $F_c$ -Wert von 0,10
- Abb. 115: Gebäude mit einem feststehenden Sonnenschutz aus freistehenden Lamellen mit einem  $F_c$ -Wert von 0,50
- Abb. 116: Großflächiger Sonnenschutz über einer Einkaufsstraße in der Innenstadt von Malaga, Spanien
- Abb. 117: Numerische Untersuchungsergebnisse zur InnenTemperatur der Wandecke und des Anschlusspunkts Fensterprofil – Wand

- Abb. 118: Grafische Auswertung der numerischen Simulation verschiedener Fenstereinbauten
- Abb. 119: Frischluft-Ansaugen des tvzeb-Gebäudes in Vicenza/Italien erfolgt über eine im Erdreich verlegten Lüftungskanal. Aufgrund der thermischen Trägheit des Erdreiches kann unter sommerlichen Bedingungen die angesaugte Luft gekühlt werden (Quelle: Architekten Traverso-Vighy, siehe Kapitel 6.1).
- Abb. 120: Pontonkonstruktion im Heijsehafen von Rotterdam aus dem Jahr 2010
- Abb. 121: Schematische Funktionsweise der natürlichen Lüftung im Ausstellungsgebäude. Durch die Anordnung von Zu- und Abluftöffnungen wird mit dem natürlichen Auftrieb der Luft die Thermik zur Kühlung des Innenraumes genutzt.
- Abb. 122: Vergrößerung der Kühl- und Heizflächen in Lüftungsrohren durch Anbringung von Stegen im Rohrinneren
- Abb. 123: Schematische Übersicht zu den anteiligen Wärmeverlusten bei einem Einfamilienhaus bei ungedämmten Wänden. Die Dämmung der Wände reduziert den Wärmeverlust über die Außenwand auf ca. 10 % des gesamten Heizwärmeverbrauchs.
- Abb. 124: Übersicht der Möglichkeiten zur Ausführung von Wandaufbauten
- Abb. 125: Fußpunkt einer Kalksandsteinwand mit einem dämmenden Kimmstein am Materialwechsel zwischen Betonbodenplatte und aufgehender Wand
- Abb. 126: Wärmebrückensimulation eines Wandfußpunktes mit einem Schaumglas-Dämmstein und der Dämmebene oberhalb der erdberührten Bodenplatte
- Abb. 127: Vergleichende Wärmebrückendarstellung bei unterschiedlichen Dämmvarianten
- Abb. 128: Wärmeleitfähigkeit üblicher Dämmstoffe
- Abb. 129: Verbesserung des U-Wertes von vorhandenen Wänden mit dem Auftrag einer nachträglichen Dämmung (Quelle: DIN EN 12831, Anlage 1, Tab. A.3, S. 24)
- Abb. 130: Draufsicht auf die Brüstung in der Rohbauphase im Fensterbereich durch den monolithischen Wandaufbau des hochgedämmten Mauerwerk des Gebäudes »2226« von Baumschlager Eberle. (Quelle: Fa. Wienerberger Ziegelindustrie GmbH)
- Abb. 131: Gebäude »2226« der Architekten Baumschlager Eberle in Lustenau/Österreich (Quelle: Baumschlager Eberle, Fotograf: Eduard Hueber/archphoto.com)
- Abb. 132: Innenansicht der Fensterelemente im Gebäude »2226« mit geschlossener und geöffneter Zuluftklappe (Quelle: Baumschlager Eberle, Fotograf: Eduard Hueber/archphoto.com)
- Abb. 133: Messwerte des Monatsverlaufs im April der Außen- und Innentemperaturen sowie des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Raumluft
- Abb. 134: Temperaturverlauf im Inneren von »2226« im Vergleich zu den Temperaturen im Außenbereich im Jahresgang
- Abb. 135: Messergebnisse zum Wärmefluss bei unterschiedlichen Dachkonstruktionen, wie Blechdach, Bitumenfoliendach, Dach mit extensiver und reduzierter intensiver Dachbegrünung. Die geringen Ausschläge der Gründachvarianten verdeutlichen den puffernden Einfluss und den geringen Einfluss der auftreffenden Globalstrahlung für den Innenraum unter sommerlichen Bedingungen (Messungen vom 09.07.2011 bis 16.07.2011). (Quelle: GRÜNSTADTKLIMA, Verband der Bauwerksbegrünung; Leitfaden »Grüne Bauweisen für Städte der Zukunft«, S. 14)
- Abb. 136: Gegenüberstellung der Luftfeuchtigkeit an einer verputzten Fassade und einer begrünten Fassade, in Beziehung zu den Messwerten zur Luftfeuchtigkeit einer Klimastation (Quelle: GRÜNSTADTKLIMA, Verband der Bauwerksbegrünung; Leitfaden »Grüne Bauweisen für Städte der Zukunft«, S. 15)
- Abb. 137: Ausschnitt der begrünten Fassade des Musée du Quai Branly in Paris, Architekt Jean Nouvel, Gartenkünstler Patrick Blanc

- Abb. 138: Schwimmhalle mit teilbegrünter Fassade vor einer Trapezblechfassade in Hamburg-Wilhelmsburg (Quelle: Generalplaner: bs2 architekten gmbh; Fassadenentwurf: Allmann Sattler Wappner Architekten GmbH)
- Abb. 139: Schematische Übersicht der sich gegenseitig beeinflussenden Prozesse des Wärmeübergangs oder der Reflexion in einem geneigten Dach
- Abb. 140: Einfaches Lüfterelement für den Einbau im Dachbereich als Bauteil einer Lüftungsanlage nach DIN 1946-6. Die Luft strömt unterhalb der Dachpfannen zum Lüftungsschlitz (Quelle: Fa. Renson).
- Abb. 141: Erwärmungsvorgang über 90 Minuten am 12.03.2012 bei ungestörten Verhältnissen und einer Bestrahlung von  $250 \text{ W/m}^2$ , Lufttemperatur der Umgebung um  $12^\circ\text{C}$
- Abb. 142: Temperaturverläufe im Tagesgang am 13.10.2011. Gemessen im Prüfstand in Winningen an der Mosel. In allen Kurvenzügen zeigt sich, wie schnell wetterbedingte Veränderung Einfluss haben auf den Erwärmungsvorgang im Schieferdach-Prüfstand.
- Abb. 143: Temperaturverläufe im Tagesgang am 20.08.2011. Gemessen im Prüfstand in Winningen an der Mosel. Alle Kurvenzüge der unterschiedlichen Messpunkte zeigen die typischen Ergebnisse an einem durchgängig sonnigen Tag. Im Zwischenraum konnte eine Temperaturzunahme der Luft von max.  $17 \text{ K}$ , am Austrittspunkt nach einem Meter Durchgang durch den Prüfstand, gemessen werden.
- Abb. 144: Schemaschnitt durch den Prüfstand mit angeschlossenem Gebläse zur Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit im Luftzwischenraum
- Abb. 145: Zunahme der Temperatur der Betonsteinober- und -unterseite bei  $200 \text{ W/m}^2$  Bestrahlung mit einem Baustellenstrahler ausgehend von unterschiedlichen Ausgangstemperaturen ( $0^\circ\text{C}$  und  $20^\circ\text{C}$ ) der Umgebung
- Abb. 146: Temperaturzunahme am Luftaustritt in Abhängigkeit zum Volumenstrom der Luft im Prüfstand bei einer Bestrahlungsstärke von  $200 \text{ W/m}^2$  und einer Umgebungstemperatur von  $18,5\text{--}20^\circ\text{C}$ .
- Abb. 147: Solarer Luftkollektor mit perforiertem Absorber als Vorhangsfassade vor der wärmeübertragenden Luftschicht und solarer Luftkollektor mit Glasabdeckung vor der Luftschicht und der Absorberebene
- Abb. 148: Rathaus der Stadt Erlangen mit Solarwall Fassade aus graulackierten Blechen auf der rechten Fassadenhälfte zwischen den Fenstern (Quelle: Seidemann Solar GmbH)
- Abb. 149: Divergierende Interessen und Bedürfnisse mit der Auswahl der Konstruktion und gesellschaftlichen Zielen
- Abb. 150: Gegensätze und Widersprüche in der Planung

## Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Zusammenstellung der Schichten der Eiskeller-Außenwand aus dem Jahr 1867
- Tab. 2: Verknüpfung von Energiequellen und möglichen technischen Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien
- Tab. 3: Die 15 Referenzregionen in Deutschland der mittleren Strahlungsintensität nach DIN V 4108.6.
- Tab. 4: Vorgaben der DIN V 4108-6 zur solaren Einstrahlung unterschiedlich orientierter Bauteilflächen während der Heizperiode.
- Tab. 5: Auszug von Gesteins- und Bodenarten und deren wärmetechnischen Eigenschaften nach VDI 4640-1, Tab. 1
- Tab. 6: Faktor für Raumluftgeschwindigkeit (Quelle: [15], S. 77)

- Tab. 7: Beispiele zur Dichte und zum Wärmeeindringkoeffizienten üblicher Materialien. Ein hoher Wärmeeindringkoeffizient steht für eine hohe Wärmespeicherfähigkeit des Stoffs. Ein kleiner Wärmeeindringkoeffizient zeigt dagegen, dass der Stoff langsamer Wärme aufnimmt und bei direkter Berührung mit der Hand als relativ warm erscheint
- Tab. 8: Vergleich einiger Baustoffe bezüglich ihres Absorptionsgrads aus Solarstrahlung und ihres Emissionsgrads (Quelle: [2], Auszug Kapitel 5.5 Strahlungsaustausch, aus Tab. 5.8, S. 633)
- Tab. 9: Übersicht üblicher wandbildender Baustoffe. Technische Werte nach DIN 4108-4:2013-02
- Tab. 10: Reduzierung des Transmissionswärmeverlustes nach Werner für unverschattete Flächen während der Heizperiode von Oktober bis Mai. Bei einem höheren Strahlungsangebot verändern sich die farbbezogenen Transmissionswärmeverluste.
- Tab. 11: Vergleichende Systeme der Beheizung und Belüftung eines Standardbürogebäudes
- Tab. 12: Gesamtvergleich mit einer Übersicht über die wesentlichen Faktoren der Systemvarianten.
- Tab. 13: Typische Auslegungswerte für den Betrieb einer Betonkernaktivierung (Quelle: Wolfgang Moises, Team für Technik GmbH)
- Tab. 14: Gegenüberstellung von heutigem Beton und römischen Beton (Quelle: [26], S. 32)
- Tab. 15: Wärmeleitfähigkeit (Bemessungswerte nach DIN 4108-4) (Quelle: Zementmerkblatt: Leichtbeton, S. 3)
- Tab. 16: Energieträger für die Berechnung von Grauer Energie (Quelle: BMUBNR: www.wecobis.de/service/lexikon/graue-energie-lex.html, abgerufen am 27.10.2014)
- Tab. 17: Primärenergieeinsatz zur Herstellung unterschiedlicher Dämmstoffe (Quelle: Energieagentur NRW)
- Tab. 18: Materialkennwerte der genutzten Baustoffe gemäß der Studie der Hochschule Luzern
- Tab. 19: Vergleich des Primärenergiebedarfs für einige übliche Baustoffe (Quelle: Schroeder, H.; Lehmbau – Mit Lehm Bau ökologisch planen; S. 25, Tab. 1–3)
- Tab. 20: Bewertungen der sommerlichen Wärmeschutzmaßnahmen und deren Einflussmöglichkeiten (Quelle: Merkblatt Sommerlicher Wärmeschutz – ein heißes Thema. Gebäudehülle Schweiz, Verband Schweizer Gebäudehüllen-Unternehmungen, Technische Kommission Energie (Hrsg.), Uzwil, 2012)
- Tab. 21: Anhaltswert für den Gesamtenergiedurchlassgrad in Abhängigkeit von der Konstruktion, des U-Wertes sowie des Glastypen (Quelle: DIN 4108-4:2013-02, S. 31, Tabelle 11)
- Tab. 22: Gegenüberstellung der anzusetzenden Rechenwerte nach DIN 4108-2 zur Bewertung des Sonnenschutzes
- Tab. 23: Übliche Lebensdauer von Wärmedämmstoffen als eingebaute Schicht (Quelle: Leitfaden Nachhaltiges Bauen, FIW München; Herstellerangaben; veröffentlicht in »Bauphysik Kalender 2011«, S. 169)
- Tab. 24: Abflussbeiwerte von Dachkonstruktionen nach DIN 1986-100:2008-05 Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke, Auszug aus Tabelle 9, als Minderungsfaktoren zur Auslegung von Regenwasser-Entwässerungsanlagen
- Tab. 25: Wärmetechnische Bemessungswerte unterschiedlicher Dachbaustoffe nach DIN V 4108-4 und DIN EN ISO 10456

## Stichwortverzeichnis

### A

Absorptionsgrad 62, 115  
 Albedo 62  
 Alhambra 19, 26  
 Außendämmung 68, 71  
 Azimut 33, 68

### B

Bädgir 24, 159  
 Barra-Costantini-System 73  
 Baustoffe, regionale 100  
 Bauweise, monolithische 90, 135  
 Behaglichkeit 51, 70, 75, 107  
 Betondachstein 147  
 Betonkernaktivierung 75, 80, 82

### D

Dachabsorber 38, 145  
 Dämmbeton 92  
 Dämmstoffe, Lebensdauer 133  
 Doppelbalkendecke 100

### E

Eigenverschattung 142  
 Einsparpotenzial 80, 92, 109, 155  
 Eiskeller 27  
 Emissionsgrad 34, 62  
 Endenergiebedarf 15  
 Energieerhalt 51, 155  
 Energiegewinne 120, 146, 155  
 Energiefähle 83, 84  
 Energieverbrauch 9, 61, 77, 95, 147  
 Erdkollektoren 47, 48  
 Erdsonden 48, 82  
 Erdwärme 31, 47

### F

Fassaden, begrünte 141  
 Fenstereinbau 127, 148

### G

Gebäudekühlung 80, 109, 129  
 Gebäudeplanung 10, 16, 40, 98  
 Geothermie 31, 46  
 Gesamtenergiedurchlassgrad 116, 118, 126  
 Globalstrahlung 31, 35  
 Graue Energie 17, 95  
 Grauer Strahler 63

### H

Heizenergiebedarf 40  
 Hemicycle House 12  
 Holzständerbau 70, 98, 104

### I

Infraleichtbeton 87, 90, 92

### K

Kaltdach 26, 145, 147, 152  
 Kerndämmung 133  
 Kondensatausfall 51  
 Kühlung 16, 19, 76, 80, 144, 151  
 Kühlung, adiabatische 145

### L

Lehm 20, 48, 100  
 Leichtbeton 85, 92, 135  
 Luftdurchströmung 153  
 Luftkollektor 153  
 Lüftung 24, 75, 126  
 Lüftungskonzepte 130, 147

**N**

Nachhaltigkeit 12, 20, 75, 95, 99  
Nachtabsenkung 55

**O**

Oberflächentemperaturen 51, 67, 101, 149  
Opus caementitium 85

**P**

Patio 19  
Phasenverschiebung 21, 70  
Porenbeton 66, 88, 138  
Primärenergieeinsatz 12, 96, 103, 147, 155

**Q**

Quantate 25

**R**

Raumausrichtung 40  
Recycling 9, 61, 92, 99, 134, 155  
Reflexionsgrad 64, 74, 115

**S**

Schaumglas 66, 92, 135  
Schiefer 48, 62, 147, 153  
Schilfdämmung 26, 100  
Schlammziegel 100  
Solarkollektor 43, 63, 101, 145  
Sonnenschutz 16, 103, 125  
Sonnenschutzglas 118  
Sonnenstand 13, 75, 107, 113, 120  
Splitgeräte 108  
Strahlungsangebot 15, 33  
Strahlungsenergie 15, 63, 73, 118  
Stroh 66, 100

**T**

Temperaturamplitudendämpfung 70  
Transmissionswärmeverluste 13, 65, 72  
Trombe-Wand 14, 74  
Trübungsfaktor 35, 42

**U**

Umweltmeteorologie 34  
Umweltwärmequellen 31

**V**

Verschattung 15, 44, 110, 120

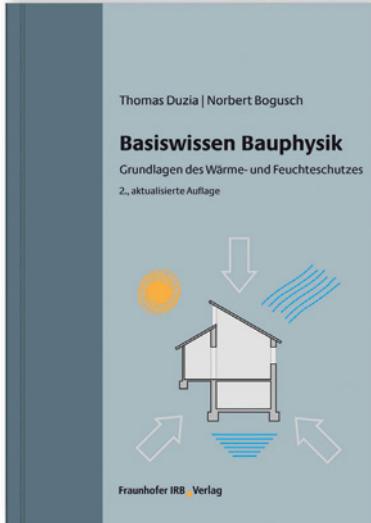
**W**

Wandabsorber 145  
Wandheizung 100, 101  
Wandkonstruktionen 68, 104, 137  
Warmdach 26, 68, 145  
Wärmebrücken 104, 134, 136  
Wärmedurchgang 21, 70, 72, 116  
Wärmegewinne 13, 46, 67, 85, 117, 145  
Wärmeleitfähigkeit 24, 28, 48, 66, 89, 101  
Wärmerezeptoren 51  
Wärmeschutz, sommerlicher 108, 112, 125  
Wärmeschutz, winterlicher 108, 133, 156  
Wärmespeicherfähigkeit, spezifische 48, 56, 66, 123  
Wärmespeicherkapazität 65, 110, 123, 124  
Wärmestrahlung 34, 54, 74, 112, 125  
Wärmestromsimulation 14  
Wärmeübergangswiderstand 38, 143  
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 155

# Basiswissen Bauphysik

## Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes

Thomas Duzia | Norbert Bogusch



2., aktual. Aufl. 2014, ca. 230 Seiten,  
zahlr. Abb. u. Tab., Kart.  
ISBN 978-3-8167-9135-5  
E-Book: ISBN 978-3-8167-9136-2

In der praktischen Anwendung verschließen sich dem planenden Architekten oder Entscheidungsträger häufig die Hintergründe der bauphysikalischen Betrachtungen. Ein teilweise unübersichtliches Regelwerk beeinträchtigt zudem die Orientierung.

Das Buch verbindet die Grundkenntnisse und Begrifflichkeiten der Bauphysik mit der Praxis und bietet einen schnellen Überblick für Planer und Architekten. Es schlägt einen Bogen von den Anfängen der Wärmelehre, über die geltenden Regelwerke und Normen bis hin zum energiesparenden Bauen und den zukünftigen Anforderungen an den Wärmeschutz. In der zweiten Auflage werden zusätzlich die EnEV 2014, die neuen Rechenansätze zum sommerlichen Wärmeschutz und das EEWärmeG behandelt.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Der Fachverlag zum Planen und Bauen

Nobelstraße 12 · 70569 Stuttgart · [www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

Thomas Duzia, Rainer Mucha

# Energetisch optimiertes Bauen

Technische Vereinfachung – nachhaltige Materialien – wirtschaftliche Bauweisen

Die Entwicklung in der technischen Gebäudeausstattung weist Parallelen zu dem auf, was in der Automobilindustrie schon lange statt zu finden scheint. Was erst als Innovation gefeiert wird, sorgt später dafür, dass die Wartung nur noch von spezialisierten Betrieben übernommen werden kann. Die Autoren vertreten den Standpunkt, dass Installationen entwickelt werden sollen, die auf eine einfache Weise von den Nutzern selbst gewartet und repariert werden können. Dabei wird die Frage erörtert, wie bei Gebäuden einerseits der Energieverbrauch gesenkt werden kann, ohne dass sich der Nutzer andererseits in Abhängigkeit von einer Technik begibt, die zusätzliche Kosten für Installation und Wartung nach sich zieht.

Mit einem Blick auf die Baugeschichte wird anhand von historischen Beispielen beschrieben, wie durch einfache konstruktive Maßnahmen der sommerliche Wärmeschutz gewährleistet werden kann oder sich solare Gewinne durch differenzierte Gebäudegeometrien und Konstruktionen zur Unterstützung von Heizung und Lüftung nutzen lassen. Diese Betrachtungen folgen zusätzlich dem Aspekt des regionalen und nachhaltigen Bauens. Es geht damit nicht nur um die prognostizierten Verbrauchswerte, wie es mit der Energieeinsparverordnung und der Bewertung zum Jahresprimärenergiebedarf geschieht, sondern auch um eine ganzheitliche Betrachtung, die auch den Lebenszyklus von der Erstellung bis zur Entsorgung oder dem Wiederverwenden von Baustoffen berücksichtigt.

Das Buch unterteilt sich in die Themenbereiche Klima, Behaglichkeit, Materialeigenschaften und Konstruktionsweisen sowie die Folgen im winterlichen wie sommerlichen Wärmeschutz. Für eine energieoptimierte Gebäudeplanung sind diese Kenntnisse in allen Bereichen notwendig, um anhand der Einflussfaktoren Bauphysik, Umwelt, Materialauswahl und Wirtschaftlichkeit die richtigen Schlüsse im Planungsalltag zum energieoptimierten Bauen ziehen zu können.

ISBN 978-3-8167-9507-0



9 783816 795070