



FREIE UNIVERSITÄT BOZEN

LIBERA UNIVERSITÀ DI BOLZANO

FREE UNIVERSITY OF BOZEN · BOLZANO

Fakultät für Naturwissenschaften
und Technik

Facoltà di Scienze
e Tecnologie

Faculty of Science
and Technology



master casaclima

Bauen mit Holz

Planungsdetails für Niedrigenergiegebäude

2., überarbeitete Auflage

Cristina Benedetti
Carlo Dal Vera
Mariangela Gavioli
Davide Gigli
Maurita Glorioso
Cristina Pasquale
Simona Pezzucchi
Elia Terzi

bu,press

bozen
bolzano
university
press

Mit freundlicher Unterstützung von:



Titel der italienischen Originalausgabe:
Costruire in legno - edifici a basso consumo energetico

Ausarbeitung der Inhalte:

Cristina Benedetti Herausgeberin
Carlo Dal Vera und **Cristina Pasquale** Ausführungsplanung
Maurita Glorioso 3D-Modellierung
Mariangela Gavioli Klimazonen
Davide Gigli Bauphysik und Dampfdiffusionsverhalten
Simona Pezzucchi Akustik und Wohnkomfort
Elia Terzi Holzbauweisen

Besonderer Dank gilt **Norbert Hofer** und **Lukas Hofer** für die kompetente Unterstützung.

Graphische Gestaltung:

Mater | generative design - www.studiomater.com
Emanuele Pangrazi Concept design und digitale Illustrationen
Chiara Poli Grafik und Layout

Übersetzung:

Architekturbüro Benedikter
Arch. Manuel Benedikter, Arch. Josef Ziernhöld

Lektorat:

Peter Erlacher, Bauphysik & Nachhaltiges Bauen, Naturns.

Gedruckt im September 2011 durch Dipdruck, Bruneck.

© 2011 by Bozen-Bolzano University Press
Freie Universität Bozen

Alle Rechte vorbehalten. Das gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Verbreitung, Übersetzung und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen. Jede Verwertung des Werkes einschließlich aller Abbildungen erfordert die schriftliche Zustimmung des Verlages.

www.unibz.it/universitypress

2., überarbeitete Aufl., September 2011
ISBN 978-88-6046-041-7

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 005

Überprüfung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens in der Planung 008

Einleitung 008

Materialeigenschaften 010

Eigenschaften des Schichtaufbaus 011

Überprüfung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens der Bauteile 012

Geoklimatische Rahmenbedingungen 012

Bauphysikalische Eigenschaften 012

Bestimmung des Schichtaufbaus 012

Thermische Analyse unter winterlichen Bedingungen 016

Das Dampfdiffusionsverhalten 018

Tauwasserbildung 018

Thermische Analyse unter sommerlichen Bedingungen 020

Klimabezogene Analyse der Baustoffe 022

Bedeutung der verwendeten Symbole 026

Details

1 · Erdberührende Bauteile 027

2 · Auskragung 045

3 · Innenwände 061

4 · Außenwand 077

5 · Gründach 093

6 · Flachdach 105

7 · Steildach · Traufbereich 119

8 · Steildach · Firstbereich 135

Wohlbefinden im Innenraum 151

Gesundheit und Wohlbefinden 152

Raumluftqualität 152

Schadstoffe und ihre Quellen 154

Kontroll- und Überwachungssysteme 155

Holz und Raumluftqualität 158

Schallschutz 159

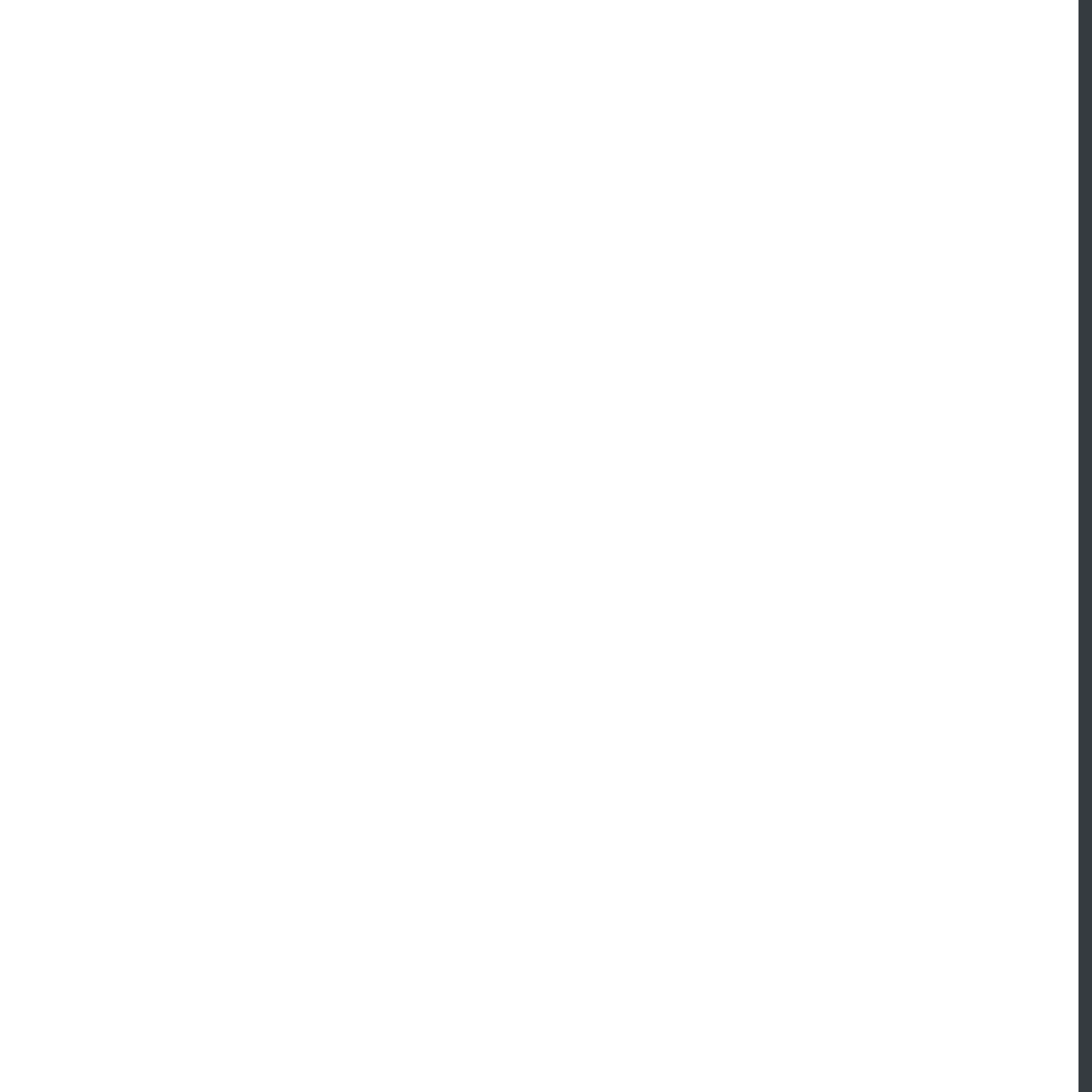
Schallübertragungsarten 160

Holzbauweise und Schallschutz 162

Einige Planungshilfen 163

Holz- und Holzwerkstoffe 165

Bibliographie 171



Einleitung

Cristina Benedetti

In der europäischen Architekturlandschaft setzt sich zunehmend eine neue Sprache durch, die sich durch den sensiblen Umgang mit Umwelt- und Energiefragen und den Einsatz unterschiedlicher Materialien auszeichnet. Die Verwendung von Holz, einem Baustoff von großem symbolischen und emotionalem Wert, der seit jeher ganze Epochen und Kulturen beeinflusst, spielt dabei stets eine wichtige Rolle in der Planung.

In vielen europäischen Staaten wird die Verwendung von Holz als wirksame Maßnahme gegen den Treibhauseffekt angesehen. Der Einsatz dieses Baustoffes wird durch Entwicklungs- und Förderprogramme sowohl in der öffentlichen als auch in der privaten Bauwirtschaft angeregt. Dennoch wird deutlich weniger Holz verbraucht als nachwächst und entgegen der vorherrschenden Meinung nehmen die Waldbestände zu, während die Wälder im Durchschnitt immer älter werden. Um für den Wald ein natürliches Gleichgewicht zu gewährleisten, ist es also notwendig, Schlägerungen und Verbrauch zu planen.

In Italien wird die Verbreitung von Wohnhäusern in Holzbauweise durch kulturelle Vorbe-

halte erschwert. Häufig werden diese Gebäude mit dem Bergchalet, behelfsweisen Unterküften oder Bauten in ländlicher Bautradition assoziiert. Zudem wird die Haltbarkeit von Holz bezweifelt, Instandhaltungsfragen werden übertrieben diskutiert, schlechtes Brandverhalten unterstellt und dabei der Brandwiderstand vergessen.

Ursache für auftretende Mängel sind vielfach eine unzureichende Planung oder eine unsachgemäße Ausführung: Den Planern fehlt es oft an Aus- und Weiterbildung bzw. an Information.

Im Holzbau ist es daher nicht nur nötig, effiziente und innovative Systeme zu entwickeln, sondern auch technisch und ästhetisch überzeugende Beispiele zu liefern. Grundlage hierfür ist eine solide Ausbildung für Planer und Handwerker.

Holzrahmenbauweise

In den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts fand gleichzeitig mit der „Eroberung“ Nordamerikas von Chicago bis zur pazifischen Küste eine revolutionäre Veränderung der seriellen Bauweisen statt. „Revolutionär“ auch deshalb, weil durch die Verwendung von Holz neue

Grundriss- und Erschließungssysteme schnell, leicht und flexibel umgesetzt werden konnten.

Die Verwendung von Holz passte in die dynamische Gesellschaft und Ökonomie des nordamerikanischen Kontinents jener Zeit. Sie war nicht nur ein kurzlebiger Trend, sondern hat auch heute noch eine große Breitenwirkung.

Jede Aktivität und jede Unternehmung erforderte schnelles Handeln. Diese Notwendigkeit ergab sich aus objektiven Gründen, wie der Besiedelung neuer Landstriche und der Errichtung neuer Bauwerke, war aber auch psychologisch begründet durch die herrschende Aufbruchstimmung und Abenteuerlust.

Gleichzeitig bewirkte die Entwicklung von Maschinen für die industrielle Produktion von Nägeln eine beachtliche Senkung der Preise und machte sie so zu einem Massenprodukt, dessen Verbreitung durch die Pioniere auf ihrem langen Marsch Richtung Westen bis in die entlegendsten Regionen vorangetrieben wurde.

Dieses bisher einzigartige Zusammenspiel sozialer, ökonomischer und bautechnischer Gegebenheiten führte zur Entstehung und Entwicklung des Balloon- und des Platform-Systems, den ersten

industrialisierten Konstruktionsmethoden im Baugewerbe. Alle dabei verwendeten Teile weisen standardisierte Maße auf, sind kostengünstig und erlauben kurze Bauzeiten: Selbst Arbeiter ohne Spezialisierung können unter Anleitung eines Vorarbeiters die Tragstruktur eines Gebäudes mittlerer Größe in etwa vier Tagen errichten. Die Forschung wandte sich im Laufe der Zeit der Entwicklung technischer Lösungen für vier- und fünfstöckige Gebäude zu. Bis dahin beschränkte sich das Einsatzgebiet des Holzbaus aufgrund der begrenzten Gebäudehöhe auf den Bau von Einfamilien- und Reihenhäusern. 1996 wurden diese Fragestellungen im Rahmen des EU-Programms „Cost action E5“ untersucht und Probleme unterschiedlicher Natur analysiert und auch gelöst: akustische und thermische Isolierung, statische Berechnungen und Darstellungsweisen, Brandverhalten und Erdbebensicherheit. All diese Aspekte wurden mit der in Großbritannien realisierten, sechsstöckigen Timber Frame 2000-Konstruktion experimentell getestet.

Kreuzweise verleimte Brettsperrholzplatten (BSP-Platten)

In Europa führten die neuen Bauweisen – mit K. Wachsmanns „General Panel System“ als Vorbild – zu vorgefertigten Systemen, die „offen“ und flexibel, sowie einfach mit ande-

ren Systemen und Materialien kombinierbar sind. Dies äußerte sich in tiefgreifenden Veränderungen der statischen Konzepte und der Architektursprache. Darüber hinaus orientierte sich die Industrie, welche sich mit der Herstellung von Holztragwerken beschäftigt, klar hin zur Produktion von Elementen mit hohen, geprüften mechanischen Eigenschaften.

Die Notwendigkeit, energie- und ressourcenschonend zu bauen, hat dazu beigetragen, dass der Energieverbrauch von Gebäuden und die Verschwendung von Materialien zurückgegangen sind, dass zunehmend erneuerbare Energien und Baustoffe eingesetzt werden und dass sich in den letzten Jahren ein neues Konstruktionssystem entwickelt hat, bei dem große Brettsperrholzplatten (BSP-Platten) die Tragfunktion übernehmen.

Diese Bauweise hat im Holzbau in Österreich und Deutschland, sowie in Südtirol und dem Veneto eine große Anhängerschaft. Die Prozessoptimierung ergibt sich aus der hohen Vorfertigung der Elemente und den extrem kurzen Realisierungszeiten des Gebäudes. Der Größe der Bauteile sind nur hinsichtlich der Transportmittel und -wege Grenzen gesetzt.

Die BSP-Platten setzen sich – dank kammartiger Verbindungen – aus großformatigen Elementen zusammen, die – je nach Herstellungsweise der Platte – mehrschichtig kreuzweise miteinander verleimt werden.

Dimension und Stärke der einzelnen Elemente (sowohl der Wand-, als auch der Deckenelemente), die Montage der einzelnen kreuzweise verleimten Schichten, die Anschlussdetails, Lage und Dicke der Dämmung sowie die verwendeten Holzarten hängen von den Patenten des jeweiligen Herstellers, den statischen Erfordernissen und nicht zuletzt vom gewünschten architektonischen Ergebnis ab.

Schlussbemerkungen

Die immer größer werdende Anzahl von Firmen, die in diesem Bereich mit großem Einsatz forschen und die Verwendung von Holz durch namhafte Architekten – von Thomas Herzog bis Tadao Ando – führen zu einer Renaissance dieses Werkstoffes. Neue Konstruktionsmethoden beim Einsatz von Massivholz eröffnen neue Möglichkeiten für Form und Ausdruck: So kann Architektur mit ausgeklügelten Details, unter Verwendung unterschiedlichster Materialien und mit besonderem Augenmerk auf Energieverbrauch und Umweltverträglichkeit entstehen.

Vor allem die wachsende Aufmerksamkeit hinsichtlich Energiesparmöglichkeiten hat eine neue Entwurfsmethodik hervorgebracht. Architektonische Entscheidungen sind seither eng mit der Nutzung erneuerbarer Ressourcen verknüpft, welche auch die ästhetischen Entscheidungen beeinflussen. Holz als Baustoff kehrt als technische

Innovation in die Bautradition zurück.

Technische Entwicklung und Qualitätskontrolle gehen dabei Hand in Hand: Die im Werk vorgefertigten Bauteile garantieren die Zuverlässigkeit des Systems und die Qualität der einzelnen Komponenten, der Arbeitsaufwand auf der Baustelle wird gering gehalten, CNC-Maschinen ermöglichen eine komplexe und exakte Verarbeitung, einen hohen Genauigkeitsgrad bei Verbindungen und die Realisierung von Werkstücken, die vor einiger Zeit noch technisch undenkbar bzw. unbezahlbar schienen.

Die Industrie konnte viele Probleme hinsichtlich Brandverhalten, Haltbarkeit und Instandhaltung lösen, welche die Anwendung dieses Baustoffs im Bereich der Tragstruktur einschränkten.

Andere Aspekte hingegen, wie z.B. die Erdbebensicherheit, verlangen eine eingehendere Prüfung, um den italienischen Normen gerecht zu werden.

Den Lehrenden aller Institutionen obliegt nun die Aufgabe, dem Informations- und Wissensmangel um die Eigenschaften dieses Baustoffes entgegenzuwirken, damit er seine technischen und architektonischen Möglichkeiten entfalten kann. In diesem Kontext entstand auch das vorliegende Buch, dessen Inhalt auf die Erfahrungen im Rahmen des Masterstudiengangs CasaClima an der Freien Universität Bozen aufbaut. In Zusammenarbeit mit dem

CNR-IVALSA (Institut für Holz- und Baumartenforschung, mit Sitz in San Michele all'Adige, unter der Leitung von Prof. A. Ceccotfi) und bei der Realisierung des SOFIE 1-Projekts arbeiteten einige „Studenten“ – die Koautoren dieses Buches – bei der Planung des neuen Gästehauses des Instituts mit. Dabei wurden die gleichen Brettsperrholzplatten (BSP-Platten) verwendet, die auch bei dem Gebäude in Miki bei den Tests zur Erdbebensicherheit zum Einsatz kamen. Die Zeichnungen der einzelnen Kapitel zum Abschnitt „Vom Projekt... zur Realisierung“ zeigen einige Details dieses Projekts sowie die dazugehörigen thermischen Analysen.

Diese Publikation stellt somit auch ein „Handbuch“ für die Planung und Realisierung eines Projektes mit kreuzweise verleimten Brettsperrholzelementen (BSP-Elemente) bzw. in Holzrahmenbauweise dar.

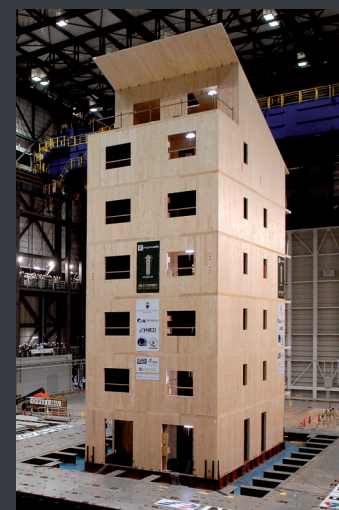
¹ SOFIE steht für Sistema cOstruttivo casa FIEEmme, einem von der Autonomen Provinz Trient geförderten Forschungsprojekt zur Entwicklung eines mehrstöckigen Tragsystems, unter Verwendung von Paneelen mit kreuzweise verleimten Schichten aus Fichtenholz (BSP-Platten), die hohen mechanischen Anforderungen bei niedrigem Energieverbrauch genügen. Gleichzeitig wurden hohe Maßstäbe bezüglich Brandverhalten, Erdbebensicherheit,

akustischem Verhalten und Haltbarkeit festgesetzt. Diese Konstruktion wird ausschließlich mit Holz aus dem Trentino realisiert und soll den Kosten einer herkömmlichen Bauweise entsprechen.

Bei der Durchführung der Versuche wurde besonderes Augenmerk auf die Erdbebensicherheit gelegt.

Die Leichtigkeit des Materials schränkt die Folgen eines Bebens ein. Die besonders gestalteten Auflager können große Mengen an dynamischer Energie aufnehmen, ohne dass das Gebäude dadurch Schaden nimmt.

Zusätzlich zu den vielen in Italien durchgeführten Versuchen fanden zwei Tests in Japan statt: einer auf der Rüttelplattform des NIED (National Institute for Earth Science and Disaster Prevention) in Tsukuba, dem weltweit wichtigsten Institut für Erdbebenforschung: Dabei wurde ein dreistöckiges Gebäude mit dieser Tragstruktur drei verschiedenen, in Typus und Stärke unterschiedlichen Erdbebensimulationen unterzogen, wovon eine dem Erdbeben von Kobe 1995 entsprach. Das Gebäude überstand alle drei Simulationen. Ein weiterer Test wurde im Oktober 2007 durchgeführt: Ein bisher einzigartiges Experiment, bei dem ein siebenstöckiges Gebäude mit dieser Tragstruktur auf der weltgrößten Rüttelplattform in Miki, Kobe einer Erdbebensimulation unterzogen wurde. Auch dieses Experiment wurde erfolgreich abgeschlossen.



SOFIE steht für Sistema cOstruttivo casa FIEEmme

Überprüfung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens in der Planung

Einleitung

Jede gebaute Struktur neigt ständig dazu, einen Ausgleich zwischen den klimatischen Bedingungen des Innen- und des Außenraums zu schaffen:

- Wärmeverhalten der Struktur als Antwort auf die Innen- und Außentemperatur, sowie auf den Unterschied zwischen Sommer und Winter;
- das Dampfdruckverhalten des Aufbaus als Antwort auf die Feuchtigkeitsverhältnisse des Innen- und Außenraumes sowie auf jene des Sommers und des Winters.

Wie stark sich die sommerlichen und winterlichen Bedingungen auswirken, hängt davon ab, in welchem klimatischen Umfeld sich das Gebäude befindet, also von Längen- und Breitengrad usw.

Die Grundinformationen beziehen sich auf einzelne Materialien. Um das Verhalten eines Konstruktionselementes in seiner Gesamtheit zu verstehen, müssen noch vertiefende Analysen und Prüfungen schrittweise durchgeführt werden, bevor man mit der Planung fortfährt.

Die hier vorgestellten Ergebnisse sollen nicht als absolute Werte gesehen werden, vielmehr geht es darum die Größenverhältnisse der einzelnen Eigenschaften und ihre Bedeutung zu verstehen: Ähnliche Materialien können zum Beispiel zu recht unterschiedlichen Ergebnissen führen, je nachdem wie sie eingesetzt werden.

Materialtabelle

N°	MATERIAL	D	ρ	m	λ	R	Sd	T _{gr} [°C]	P _{sat} [Pa]	P _d [Pa]	c	f ₀		
SCHICHTNUMMER	MATERIALBESCHREIBUNG													
		A		B		E	TEMPERATURVERLAUF	SÄTTIGUNGSDRUCK	DAMPFD RUCK AM SCHICHTÜBERGANG		D			

Beschreibung des Schnitts

ZU PRÜFENDES ELEMENT		
Dicke	[cm]	A
flächenbezogene Masse	[kg/m ²]	B
Wärmedurchgangswiderstand	[m ² K/W]	C
Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m ² K]	
Phasenverschiebung der thermischen Welle		D
Temperaturamplitudenverhältnis		

Ergänzende Informationen

	EINZELNES MATERIAL	KOMPLETTER SCHICHTAUFBAU
A · geometrische Eigenschaften		
Dicke	D [cm]: Dicke in cm	D [cm]: Dicke in cm
B · physikalische Eigenschaften		
Rohdichte	ρ [kg/m ³]: Gewicht eines Kubikmeters des Materials	
flächenbezogene Masse		m [kg/m ²]: Gewicht eines Quadratmeters des Schichtaufbaus ($\rho \cdot d$)
Wärmeleitfähigkeit	λ [W/mK]: Wärmeleitfähigkeit des Materials	
Wärmedurchlasswiderstand	R [m ² K/W]: Widerstand, den ein Material dem Hindurchtreten des Wärmestroms entgegensetzt [R=(d/λ)]	
C · thermische Eigenschaften (Winter)		
Wärmedurchgangswiderstand		Widerstand, den ein Schichtaufbau dem Hindurchtreten des Wärmestroms entgegensetzt [R _{ges} =(R _{st} +Σ(d/λ)+R _{se})]
Wärmedurchgangskoeffizient		U [W/m ² K]: Wärmestromdurchgang durch einen Schichtaufbau (1/R _{ges})
D · thermische Eigenschaften (Sommer)		
spezifische Wärmekapazität	C [J/kgK]: Gibt an, wie viel Wärme pro Temperaturänderung gespeichert werden kann.	
modifizierte Fourierzahl	f ₀ [-]: Fähigkeit des einzelnen Materials, die Temperaturschwankungen zu dämpfen	
Phasenverschiebung		φ [h]: Ist die Zeitspanne, die vergeht, bis eine Temperaturwelle das Bauteil durchwandert hat.
Temperaturamplitudenverhältnis		[%]: Verhältnis von Temperaturamplitude innen zu außen
E · Dampfdiffusionsverhalten		
	μ [-]: Dampfdiffusionswiderstand	
	Sd [m]: diffusionsäquivalente Luftschichtdicke (μ•s)	

Materialeigenschaften

Dicke D (cm)

Die Dicke eines Baustoffes hängt von statischen und thermischen Faktoren und davon ab, welche Dicken produziert werden.

Rohdichte ρ (kg/m³)

Die Rohdichte eines Körpers ist das Verhältnis seiner Masse zu seinem Volumen.

Sie wird durch die Materialbeschaffenheit bestimmt und trägt maßgeblich dazu bei, ob ein Material für bestimmte Aufgaben geeignet ist.

In der Regel gilt, dass sich ein Material umso besser als Wärmedämmung im Winter eignet, je niedriger seine Rohdichte ist. Bei hoher Rohdichte hingegen bietet ein Material besseren Schutz vor sommerlicher Wärme, da es ein trägeres thermisches Verhalten aufweist.

Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK)

Die Wärmeleitfähigkeit gibt an, wie viel Wärme pro Quadratmeter im Ruhezustand durch eine einen Meter dicke Schicht eines homogenen Materials fließt, wenn die beiden parallel zueinander gegenüberliegenden Seiten einen Temperaturunterschied von einem Kelvin aufweisen. Der Wärmefluss findet ausschließlich aufgrund des Temperaturunterschiedes statt. Je kleiner der λ -Wert ist, umso weniger Wärme fließt durch das Material.

Wärmedurchlasswiderstand R (m²K/W)

Der Wärmedurchlasswiderstand ergibt sich aus dem Verhältnis von Dicke der Schicht und Wärmeleitfähigkeit des Materials. Ein hoher Wert steht für gute Dämmeigenschaften. Die Summe aller Wärmedurchlasswiderstände ergibt noch nicht den Wärmedurchgangswiderstand. Es müssen auch die Wärmeübergangswiderstände der Oberflächen dazugezählt werden, die je nach Bauteil (Wand, Decke, Dachaufbau usw.) und je nach Konstruktionsweise (z.B. hinterlüftete Wand) unterschiedlich sind.

Dampfdiffusionswiderstandszahl μ (-)

Dieser Wert ist eine reine Vergleichszahl und gibt an, um wie viel der Widerstand eines Baustoffes größer ist als der Widerstand einer gleich dicken Luftschicht. Ein hoher μ -Wert bedeutet einen größeren Dampfdiffusionswiderstand: Der Wert von Glas z.B. tendiert gegen unendlich, Dampfsperren wie PE-Folien (Polyethylen) haben Werte über 1000. Der μ -Wert kann mit der Feuchte des Materials

schwanken: Meistens nimmt der Dampfdiffusionswiderstand mit steigender Feuchtigkeit ab.

Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d (m)

Der s_d -Wert eines Materials gibt an, wie dick (in Metern) eine stehende Luftschicht sein muss, um den gleichen Dampfdiffusionswiderstand zu erreichen. Dünne Materialien mit einem hohen μ -Wert können genau soviel Dampf durchlassen, wie Materialien mit großer Schichtdicke und einem niedrigen μ -Wert. Der s_d -Wert ist für die oft weniger als einen Millimeter dicken Bahnen und Abdichtungen sehr nützlich, da es schwierig ist, eine sinnvolle Materialdicke für sie anzugeben. Es ist daher praktischer einen Wert für die Größe der dem Material entsprechenden Luftschicht anzugeben.

Spezifische Wärmekapazität c (J/kgK)

Die spezifische Wärmekapazität eines Materials gibt die Wärmemenge an, die notwendig ist, um die Temperatur eines Kilos desselben Materials um ein Kelvin zu erhöhen.

Die spezifische Wärmekapazität beschreibt, wie schnell die Reaktion eines Materials auf einen Temperaturwechsel erfolgt.

Modifizierte Fourierzahl f_0

Vereinfacht gesagt beschreibt dieser Wert die Fähigkeit der Materialien aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften, Temperaturspitzen abzdämpfen. Materialien mit einem hohen f_0 -Wert haben eine größere abdämpfende Wirkung gegenüber den Temperaturwellen, die das Bauteil durchwandern.

Der f_0 -Wert wird in Abhängigkeit vom Wärmedurchlasswiderstand und vom Wärmeeindringkoeffizienten für jede Bauteilschicht berechnet und angegeben. Er wird durch die Formel $f_0 = d/\lambda \cdot \sqrt{b} \cdot \sqrt{(\pi/T)}$ berechnet, wobei der Wärmeeindringkoeffizient b mit $[\lambda \cdot c \cdot \rho]$ berechnet wird.

Temperaturleitfähigkeit a

Die Temperaturleitfähigkeit beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich Wärme in einem Material ausbreitet. Sie wird mit der Formel $a = \lambda/(c \cdot \rho)$ berechnet.

Eigenschaften des Schichtaufbaus

Gesamtstärke (d)

Bei einem Niedrigenergiehaus erreichen bestimmte Bauteile, seien es nun Wände, Decken oder Dächer wegen der erhöhten Anforderungen an die Wärmedämmung in der Regel eine beachtliche Stärke.

Flächenbezogene Masse m' (kg/m²)

Die flächenbezogene Masse gibt das Gewicht eines Quadratmeters der Fläche des Konstruktionselementes an. Sie entspricht der Summe der Massen der einzelnen Schichten.

In den einschlägigen Normen sind Mindestwerte für die flächenbezogene Masse angegeben. Eine allgemein gültige Regel gibt es hier nicht, da der ideale Wert vom Standort und den klimatischen Bedingungen, sowie von der Nutzung des Bauwerks abhängt.

Wärmedurchgangskoeffizient U (W/m²K)

Der Wärmedurchgangskoeffizient oder Wärmedämmwert ist ein Maß für den Wärmestromdurchgang durch einen Schichtaufbau, wenn auf beiden Seiten verschiedene Temperaturen herrschen. Er gibt die Energiemenge an, die in einer Sekunde durch eine Fläche von einem Quadratmeter fließt, wenn sich die beidseitig anliegenden Temperaturen stationär um ein Kelvin unterscheiden. Es ist der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes eines Schichtaufbaus und wird normalerweise angegeben, um auszusagen wie gut ein Material dämmt. Im italienischen Gesetzesdekret 192/2005 und den darauf folgenden Änderungen werden für architektonische Elemente Mindestwerte in Abhängigkeit der Klimazone, in der das Gebäude errichtet wird, festgesetzt.

WERT	BEWERTUNG	
$U > 0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$	schlecht	•
$0,75 \text{ W/m}^2\text{K} > U > 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$	durchschnittlich	••
$0,25 \text{ W/m}^2\text{K} > U > 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$	gut	•••
$U < 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$	sehr gut	••••

Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_D (m)

Die Summe der einzelnen s_D -Werte jedes einzelnen Materials eines Schichtaufbaus bestimmt ihren gesamten s_D -Wert. Je kleiner dieser Wert ist, desto weniger Widerstand setzt die Schicht dem

Dampfdruck entgegen: Ein korrektes Dampfdiffusionsverhalten wird jedoch weniger durch den absoluten s_D -Wert als vielmehr durch die richtige Reihung der einzelnen Schichten bestimmt.

WERT des einzelnen Materials	BEWERTUNG	
$s_D < 0,1$	dampfdiffusionsoffene Bahn	
$s_D > 1$	Dampfbremse	
$s_D > 100$	Dampfsperre	
$s_D > 1000$	undurchlässige Schicht	

Phasenverschiebung φ (h)

Die Phasenverschiebung gibt die zeitliche Verzögerung an, mit der eine Temperaturwelle von außen im Innenraum ankommt. Theoretisch wäre eine Phasenverschiebung von zwölf Stunden ideal, da in den kühleren Nachtstunden die Wärme wieder abgeführt werden kann. Bei einer Phasenverschiebung von mehr als 24 Stunden tendiert die Innentemperatur zu einem idealen Gleichgewicht, da die wieder abgestrahlte Wärme sehr gering ist.

WERT	BEWERTUNG	
$\varphi < 8 \text{ h}$	schlecht	•
$8 \text{ h} < \varphi < 12 \text{ h}$	durchschnittlich	••
$12 \text{ h} < \varphi < 24 \text{ h}$	gut	•••
$\varphi > 24 \text{ h}$	sehr gut	••••

Amplitudendämpfung

Unter dem Temperaturamplitudenverhältnis TAV versteht man das Verhältnis in Prozent der maximalen Temperaturschwankung an der inneren zur maximalen Temperaturschwankung an der äußeren Bauteiloberfläche. Je größer die Phasenverschiebung ist, desto kleiner wird das Temperaturamplitudenverhältnis.

WERT	SCHWANKUNG	
$\% > 10$	hoch	•
$10 > \% > 1$	durchschnittlich	••
$1 > \% > 0,1$	niedrig	•••
$\% < 0,1$	nicht wahrnehmbar	••••

Überprüfung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens der Bauteile

1 · Geoklimatische Rahmenbedingungen

Es ist nicht möglich, die Ergebnisse der Analysen und Tests des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens zu verstehen, ohne sie in ihrem geografischen und klimatischen Kontext zu sehen. Die genaue Beschreibung dieses Umfelds ist sehr wichtig. Nicht alle auf dem Markt erhältlichen Softwarepakete ermöglichen die Einsicht in die verwendeten Datenbanken, bzw. stellen nur lückenhaft Daten zur Verfügung oder beziehen sich auf nicht aktuelle, bzw. nicht in Kraft getretene Normen. Daher ist es unerlässlich zu wissen, wie die geoklimatischen Bedingungen erfasst wurden und werden, um nötigenfalls fehlende Daten ergänzen zu können.

INPUT:

Geoklimatische Rahmenbedingungen der betreffenden Gemeinde:

- monatliche Mittelwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit,
- durchschnittliche Tiefsttemperatur im Winter,
- Klimazone,
- Heizgradtage,
- Meereshöhe.

OUTPUT:

Die Leistungsfähigkeit des Elementes und Vorgaben durch die Norm.

Die monatlichen Mittelwerte und die durchschnittliche Tiefsttemperatur im Winter sind nur für die italienischen Provinzhauptstädte in den UNI-Normen aufgelistet. Heizgradtage, Klimazone und Meereshöhe sind hingegen Werte, die für jede Gemeinde definiert sind. Da es sich um offizielle Werte handelt, sollte man sie mit Bedacht einsetzen, um etwaige Fehlerquellen und Missverständnisse ausschließen zu können.

Soweit möglich sollten für die Berechnungen unanfechtbare geoklimatische Werte der entsprechenden Norm herangezogen werden. Die Verwendung von aktuelleren Daten (wie sie z.B. meteorologische Messstationen liefern) kann jedoch, soweit verfügbar, zu realistischeren Ergebnissen führen. In diesem Fall müssen die ermittelten Daten einen Zeitraum von mindestens 15 Jahren abdecken. Die Datenquelle muss genannt und die Verantwortung für die Richtigkeit der verwendeten Angaben übernommen werden.

2 · Bauphysikalische Eigenschaften

Soweit vom Baustoffproduzenten Zertifikate unabhängiger notifizierter und akkreditierter Prüfinstitute zur Verfügung gestellt

werden, sollten diese als Grundlage herangezogen werden, da sie realistischere Werte beinhalten. Als Planer oder Bauherr hat man das Recht, solche Zertifikate einzufordern. Bei Beanstandungen im Falle von Unstimmigkeiten der errechneten Ergebnisse und Leistungen kann sich der Planer durch die Verwendung zertifizierter Werte schadlos halten. Sind solche zertifizierten Werte nicht verfügbar, sind jene der UNI-Norm heranzuziehen, welche die allgemeinen Eigenschaften für verschiedene Materialien beinhalten.

3 · Bestimmung des Schichtaufbaus

Die richtige Reihenfolge der einzelnen Schichten hat zwar für den Wärmedurchgangskoeffizienten keinerlei Bedeutung, sehr wohl aber in Hinblick auf das Dampfdiffusionsverhalten und auf das Verhalten des Bauteils im Sommer. Eine fehlerhafte Schichtreihenfolge führt zu einer fehlerhaften Bewertung des Bauteils.

Es gilt auch zu beachten, in welche „Richtung“ das Programm rechnet, d.h. von innen nach außen oder umgekehrt. Bei allen Softwarepaketen kann man das entsprechende Bauteil auswählen, für das die Berechnung ausgeführt werden soll, wie z.B. Wand, Decke oder Dach. Dies bestimmt, wie die thermische Strahlung auf die Außenseiten der einzelnen Schichtaufbauten trifft und damit den dort stattfindenden Wärmeaustausch (R_{si} ed R_{se}), der je nach Bauteil variieren kann.

Wie bereits erwähnt, ist die richtige Reihenfolge der Schichten von fundamentaler Bedeutung. Das soll das folgende Beispiel veranschaulichen.

	Dicke (D)	Rohdichte (ρ)	Wärmeleitfähigkeit (λ)	spezifische Wärmekapazität (c)
Brettsper Holz	14,2 cm	500 kg/m ³	0,130 W/mK	2100 J/kgK
Steinwolle	8 cm	55 kg/m ³	0,035 W/mK	830 J/kgK

Eine rasche Analyse von Wärmedurchgangskoeffizient, Phasenverschiebung, bzw. Temperaturamplitudenverhältnis zeigt, wie die Reihung der Schichten die Leistungsfähigkeit des gesamten Bauteils beeinflusst.

(Siehe Tabellen auf der nächsten Seite)

	Wärmedurchgangskoeffizient U	Phasenverschiebung ϕ	Temperaturamplitudenverhältnis TAV
INNEN	0,28 W/m ² K	12,4 h	2%
Brettsper Holz			
Steinwolle			
AUSSEN			

	Wärmedurchgangskoeffizient U	Phasenverschiebung ϕ	Temperaturamplitudenverhältnis TAV
INNEN	0,28 W/m ² K	10,6 h	16%
Steinwolle			
Brettsper Holz			
AUSSEN			

(Für die Berechnungen wurde das Softwarepaket Dämmwerk 2005 verwendet)

Für die Berechnung des Dampfdiffusionswiderstandes und des Feuchtigkeitsgehalts eines Schichtaufbaus ist die Reihung der Schichten von großer Bedeutung. Das unterschiedliche Diffusionsverhalten der einzelnen Schichten beeinflusst das gesamte Verhalten des analysierten Schichtaufbaus.

Die nachfolgende Tabelle zeigt einen korrekten Schichtaufbau einer Außenwand aus BSP-Elementen. Art und Dimensionierung der Wärmedämmung entsprechen einem Klimahaus A bzw. Klimahaus Gold in der Klimazone E.

		D [cm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Sd [m]	c [J/kgK]
	INNEN					
1	Gipsfaserplatte	1,25	1180	0,360	0,14	1000
2	Gipsfaserplatte	1,25	1180	0,360	0,14	1000
3	Flachsfaserdämmung	6,00	30	0,040	0,06	1550
4	Luftdichtungsbahn	-	-	-	0,04	-
5	BSP-Element	14,20	500	0,130	7,10	1600
6	Holzfaserdämmung	8,00	130	0,040	0,40	1400
7	Holzfaserdämmung	8,00	130	0,040	0,40	1400
8	diffusionsoffene Fassadenbahn	-	-	-	0,10	-
	AUSSEN					

Zwei Aspekte sind zu beachten: Der μ -Wert wurde vom Programm bereits in den Sd-Wert umgerechnet. Dies geschieht durch die einfache Gleichung $S_d = \mu \cdot D$; es wäre von Vorteil, auch die Materialdicke in Metern anzugeben. Üblicherweise werden in der Architektur und der Tragwerksplanung aber Zentimeter verwendet, weswegen auf die korrekte Maßeinheit zu achten ist.

Vom planerischen Gesichtspunkt her gesehen, ist die Konstruktion unvollständig: Es fehlen die Holzpfeiler, die im Innenbereich die Gipsplatten tragen, bzw. im Außenbereich die Wärmedämmung. Der Aufbau ist also inhomogen.

Ein inhomogener Schichtaufbau ist dadurch definiert, dass er nicht mit einer einzigen Schichtenfolge beschreibbar ist.

Eine Ziegelmauer mit einer einschichtigen Wärmedämmung ist ein homogener Schichtaufbau, während eine Wand mit über die gesamte Fläche verteilten Holzstehern und Befestigungselementen für die Verkleidung inhomogen ist.

Um das gesamte System beschreiben zu können, muss man es in verschiedene Schichtaufbauten aufteilen, die dann einzeln analysiert werden. Der inhomogene Teil muss also ebenfalls untersucht und dann seinem prozentualen Anteil an der Gesamtstruktur entsprechend miteinbezogen werden, um schließlich einen gewichteten Gesamtwert für den Schichtaufbau zu erhalten.

In der Praxis werden die Wärmedurchgangskoeffizienten von zwei Schichtaufbauten berechnet. Nachdem Breite und Achsabstand des inhomogenen Schichtaufbaus bestimmt wurden kann der prozentuelle Anteil dieses Schichtaufbaus berechnet werden, um so schließlich den endgültigen Wert zu erlangen, der beide Schichtaufbauten ihrem Anteil entsprechend berücksichtigt.

In der folgenden Tabelle sind die inhomogenen Bauteilschichten durch fette Kursivschrift hervorgehoben: z.B. wird die Flachsfaserdämmung in regelmäßigen Abständen von einem Holzpfeiler unterbrochen.

		D [cm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Sd [m]	c [J/kgK]
	INNEN					
1	Gipsfaserplatte	1,25	1180	0,360	0,14	1000
2	Gipsfaserplatte	1,25	1180	0,360	0,14	1000
3	Flachsfaserdämmung	6,00	30	0,040	0,06	1550
	Holzpfeiler	6,00	500	0,13	4,00	2500
4	Luftdichtungsbahn	-	-	-	0,02	-
5	BSP-Element	14,20	500	0,130	7,10	1600
6	Holzfaserdämmung	8,00	130	0,040	0,40	1400
	Pfeiler aus Fichtenholz	8,00	500	0,13	4,00	2500
7	Holzfaserdämmung	8,00	130	0,040	0,40	1400
	horizontale Lattung	8,00	500	0,13	4,00	2500
8	diffusionsoffene Fassadenbahn	-	-	-	0,10	-
	AUSSEN					

Im Folgenden werden zwei Schichtaufbauten des gleichen Bauteils analysiert:

	SCHNITT 1	D [cm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Sd [m]	c [J/kgK]
	INNEN					
1	Gipsfaserplatte	1,25	1180	0,360	0,14	1000
2	Gipsfaserplatte	1,25	1180	0,360	0,14	1000
3	Flachfaserdämmung	6,00	30	0,040	0,06	1550
4	Luftdichtungsbahn	-	-	-	0,04	-
5	BSP-Element	14,20	500	0,130	7,00	2100
6	Holzfaserdämmung	8,00	130	0,040	0,40	2100
7	Holzfaserdämmung	8,00	130	0,040	0,40	2100
8	diffusionsoffene Fassadenbahn	-	-	-	0,30	-
	AUSSEN					

	SCHNITT 2	D [cm]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	Sd [m]	c [J/kgK]
	INNEN					
1	Gipsfaserplatte	1,25	1180	0,360	0,14	1000
2	Gipsfaserplatte	1,25	1180	0,360	0,14	1000
3	Holzpfeosten	6,00	500	0,13	4,00	2100
4	Luftdichtungsbahn	-	-	-	0,04	-
5	BSP-Element	14,20	500	0,130	7,00	2100
6	Pfeosten aus Fichtenholz	8,00	500	0,13	4,00	2100
7	horizontale Lattung	8,00	500	0,13	4,00	2100
8	diffusionsoffene Fassadenbahn	-	-	-	0,30	-
	AUSSEN					

Um die Ermittlung des prozentuellen Anteils zu verstehen, wollen wir vorerst nur die Schichten 1 bis 3 betrachten:

doppelte Gipsfaserplatte				
Flachfaserdämmung	Holzpfeosten	Flachfaserdämmung	Holzpfeosten	Flachfaserdämmung
17 cm	3 cm	60 cm	3 cm	17 cm

Der Einfachheit halber betrachten wir einen Quadratmeter der Oberfläche. Das ergibt $(0,17 + 0,60 + 0,17) \cdot 1 \text{ m}^2$ Flachfaserdämmung und $(0,03 + 0,03) \cdot 1 \text{ m}^2$ Holzpfeosten, bzw. 94% Anteil des Schichtaufbaus, der die Dämmung beinhaltet gegenüber 6% Anteil des Schichtaufbaus durch die Holzpfeosten. Der U-Wert des gesamten inhomogenen Schichtaufbaus ist ein gewichteter Mittelwert der Werte der beiden Schichtaufbauten.

ACHTUNG: Dieses Beispiel ist nur eine Vereinfachung eines komplexeren Rechenvorgangs und kann daher nicht als vereinfachte Vorgehensweise bei einer solchen Berechnung gesehen werden. Bezugsgrundlage sind immer die einschlägigen Normen bzw. die verwendeten Softwarepakete.

Weist ein Schichtaufbau verschiedene Grade an Inhomogenität auf, so wird die Berechnung dementsprechend aufwändiger und ungenauer. Vor allem bei Inhomogenität in unterschiedlichen Richtungen erweist sich eine präzise Beurteilung als schwierig. Ein senkrecht stehender Pfeosten ist in einem Horizontalschnitt leicht zu erfassen, genauso wie eine horizontale Lattung in einem Vertikalschnitt. Tritt aber eine Kombination aus vertikaler und horizontaler Inhomogenität in einem Bauteil auf, wird die Berechnung komplex.

Aus diesem Grund werden in diesem Buch sämtliche Materialien eines Schichtaufbaus, auch wenn dieser inhomogen ist, aufgeführt. In den Übersichtstabellen, welche die generellen Eigenschaften eines Bauteils enthalten, sind hingegen die bereits bereinigten und gemittelten Werte aufgeführt. Daher kann es zu Unstimmigkeiten zwischen diesen Werten und denen, die sich aus den Schichttabellen ergeben, kommen. Wie sich zeigt, können die Ergebnisse der hier angeführten Beispiele und jene, welche jeder einzelne Planer selbst berechnet, aus verschiedenen Gründen voneinander abweichen. Die Ergebnisse hängen, wie bereits eingangs erwähnt, sowohl von der Berechnungsmethode als auch von Nebenfaktoren ab.

Die angeführten Werte sind nicht als absolut und eindeutig zu betrachten: Wichtiger als der einzelne Wert ist die Größenordnung. Weiters ist es wichtig, die Art, wie bestimmte Eigenschaften erreicht werden können zu erörtern und schließlich das jeweilige Element so auszuführen, dass es den angesprochenen Eigenschaften entspricht.

Die folgenden beschriebenen Einzelschritte dürfen trotz der im Buch notwendigen Reihung nicht isoliert betrachtet werden, sondern sie sind die Teile eines zusammenhängenden Planungsprozesses.

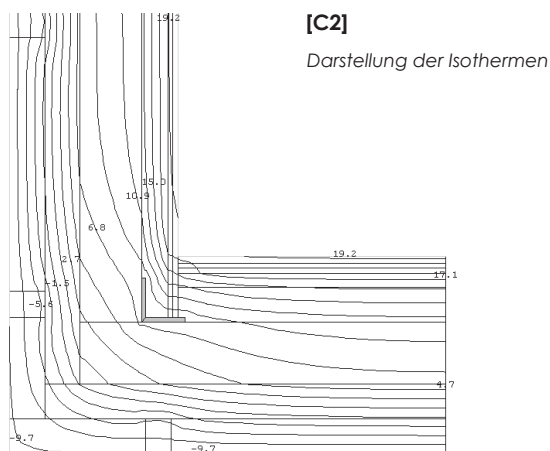
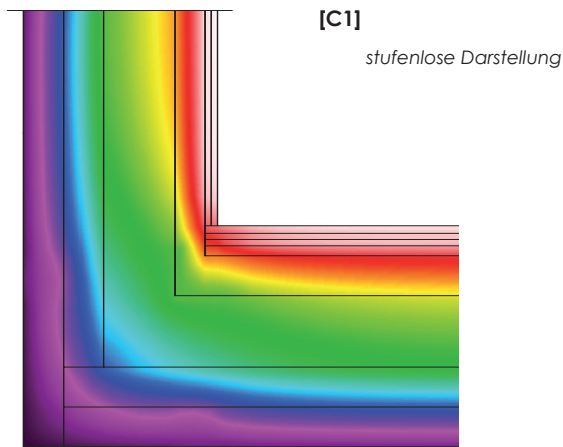
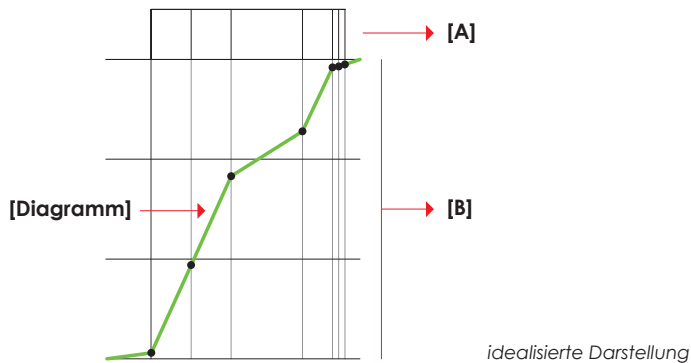
4 · Thermische Analyse unter winterlichen Bedingungen

Die thermische Analyse unter winterlichen Bedingungen ist einfach.

Sobald die Reihenfolge der einzelnen Schichten bestimmt ist, müssen für jedes Material folgende Werte ermittelt werden:

- Dicke
- Dichte
- flächenbezogene Masse
- Wärmeleitfähigkeit
- Wärmedurchgangswiderstand
- Wärmedurchgangskoeffizient.

Diese Werte reichen aus, um die thermische Leistungsfähigkeit des Gebäudes aufgrund der verwendeten Materialien und deren physikalischen Eigenschaften zu bestimmen. Um festzustellen, ob es für bestimmte klimatische Bedingungen geeignet ist, muss ein spezifischer Ort in der Berechnung festgelegt werden.



TEMPERATURVERLAUF

[A]

Die Dicke der einzelnen Schichten ist maßstäblich gezeichnet. Aus dem Diagramm ist der Verlauf der Temperatur im inneren des Schichtaufbaus ersichtlich. Für die Planung wird eine Innentemperatur von 20 °C und eine Außentemperatur von -10 °C angenommen.

[B]

Für die Bauteile im Inneren des Gebäudes (Zwischenwände, bzw. tragende Trennwände) wird für die unbeheizte Seite eine Temperatur von 12 °C angenommen. Für erdberührende Bauteile wird die Außenseite mit 4 °C berechnet, da davon ausgegangen werden kann, dass diese Temperatur im Winter konstant in einem Meter Tiefe herrscht.

[C]

Die stufenlose Darstellung [C1] des Temperaturverlaufs ist im Vergleich zur Darstellung der Isothermen [C2] leichter lesbar und erleichtert das Erkennen von Wärmebrücken.

[Diagramm]

Die Beobachtung des Temperaturverlaufs im Inneren eines Schichtaufbaus erlaubt die Kontrolle über die mögliche Bildung von Tauwasser.

Durch die grafische Darstellung ist leicht erkennbar, wo die neuralgischen Punkte sind, bzw. wo sich das Bauteil „nicht korrekt“ verhält. Die Temperatur soll gleichmäßig von innen nach außen hin abnehmen.

5.1 · Das Dampfdiffusionsverhalten

Das Dampfdiffusionsverhalten eines Bauteils ist mit großer Sorgfalt zu untersuchen. Es bestimmt den theoretischen Temperaturverlauf und den herrschenden Dampfdruck im Inneren des Schichtaufbaus. Das Glaserdiagramm berücksichtigt nur jeweils eine Innentemperatur und -feuchtigkeit bzw. eine Außentemperatur und -feuchtigkeit. Diese Art der Beurteilung kann für die Einschätzung der widrigsten Bedingungen herangezogen werden.

Die anzuwendenden durchschnittlichen Tiefsttemperaturen im Winter sind im italienischen D.P.R. 1052 vom 28.6.1977 – Ausführungsverordnung des Gesetzes Nr. 373 vom 30.4.1976 definiert, welches sich auf den Heizenergieverbrauch von Gebäuden bezieht. Man erreicht eine zusätzliche planerische Sicherheit, indem man noch tiefere Temperaturen annimmt und die relative Feuchtigkeit erhöht. Dadurch erzeugt man theoretische Gegebenheiten, die widriger als die realen sind. Um den unterschiedlichen Situationen gerecht zu werden, liegen diesem Buch die folgenden Werte zu Grunde:

- 20 °C für Innenräume;
- -10 °C für den Außenraum;
- 4 °C für das Erdreich in einem Meter Tiefe;
- 12 °C für unbeheizte Innenräume.

Grundlegende Werte für diese Analyse sind der Dampfdiffusionsfaktor (μ -Wert) mit relativer Luftfeuchtigkeit < 50% (trockene Bedingungen) und mit relativer Luftfeuchtigkeit > 50% (feuchte Bedingungen) und die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke (S_d -Wert). Der μ -Wert ist in der UNI-Norm 12524 definiert. Für im Handel befindliche Produkte muss der zertifizierte Wert dem technischen Beiblatt entnommen werden. Die Summe seiner S_d -Werte beschreibt den Widerstand eines Schichtaufbaus, den er dem Dampfdruck entgegensetzt: Hohe Werte bedeuten, dass er undurchlässig, niedrige hingegen, dass er diffusionsoffen ist. Ein guter Schichtaufbau setzt der Dampfdiffusion nach außen hin immer weniger Widerstand entgegen, lässt den überschüssigen Wasserdampf nach außen treten und stellt so ein Gleichgewicht zu den Verhältnissen des Außenraums her. Die Analyse des Dampfdiffusionsverhaltens unter diesen Gegebenheiten, d.h. unter den schlechtesten Bedingungen, die aller Wahrscheinlichkeit nach auftreten können, ist eine Maßnahme für eine erhöhte planerische Sicherheit. Die im Handel befindlichen Softwarepakete erzeugen meistens eine tabellarische bzw. grafische Darstellung von Temperatur, Dampfdruck und Sättigungsdruck zwischen den einzelnen Schichten, anhand derer man den Verlauf erkennen kann. Diese Analyse beschreibt allerdings nicht das Gesamtverhalten, das ein Aufbau im Laufe eines Jahres durchläuft.

5.2 · Tauwasserbildung

Analysen zur Tauwasserbildung, sei es an der Oberfläche oder im Inneren eines Bauteils schließen die Untersuchung zum Dampfdiffusionsverhalten ab.

Die Materialeigenschaften und die klimatischen Bedingungen, in denen der jeweilige Schichtaufbau geplant ist, müssen unbedingt zueinander in Zusammenhang gesetzt werden.

Durch diese Untersuchung können jene Bereiche lokalisiert werden, wo aufgrund der jeweiligen relativen Luftfeuchtigkeit im Gebäudeinneren die Temperatur an der Bauteilinnenseite unter den Taupunkt fällt. Das kann durch Wärmebrücken oder eine falsche Reihenfolge der Schichten hervorgerufen werden. Die Folgeerscheinungen sind Schimmelbildung, Abbröckeln des Putzes oder allgemein gesehen Verschleißerscheinungen der Baustoffe. Diese Untersuchung wird anhand des **Temperaturfaktors** vorgenommen. Dieser Parameter wird in der UNI-Norm 13788:2003 definiert:

„Differenz zwischen der Temperatur auf der Innenoberfläche eines Bauteils und der Außenlufttemperatur, bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen Innenluft und Außenluft. Die Oberflächentemperatur wird mit einem definierten Wärmeübergangswiderstand R_{si} ermittelt.“

Die Überprüfung von innerer Tauwasserbildung beschreibt gemäß der UNI-Norm 13788:2003 den Verlauf innerhalb der Kondensations- und Verdampfungszyklen im Inneren des Schichtaufbaus, um allfällige Tauwasserbildungen an den Materialübergängen festzustellen.

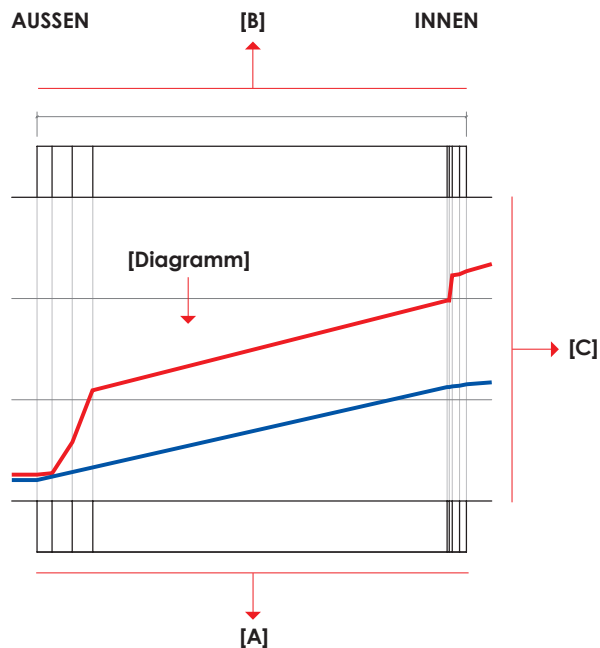
Es muss festgehalten werden, dass entgegen dem, was in den einschlägigen Gesetzen steht, die Annahme von statischen Bedingungen zu falschen, bzw. zu ungenauen Ergebnissen führt, die selbst für eine „Vorbemessung“ unzureichend sind. Es gibt verschiedene Berechnungsmethoden, welche zunehmend komplexere Situationen simulieren können. Das Glaserdiagramm kann also nicht mehr als ein Sicherheitsnachweis für die theoretisch schlechtestmöglichen Bedingungen sein. Für eine realistischere Analyse des Verhaltens eines Bauteils unter bestimmten klimatischen Bedingungen sind dynamische Simulationen notwendig. Einen guten Kompromiss bietet die Methode der mittleren Monatstemperaturen. Jedem Monat wird ein Mittelwert aufgrund Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit, ermittelt von lokalen meteorologischen Messstationen, zugeteilt. Auf diese Weise werden die Schwankungen dieser Werte im Gebäudeinneren und im Außenraum besser erfasst.

Vereinfacht dargestellt:

Man erstellt jeweils mit den monatlichen Mittelwerten zwölf Glaserdiagramme, überprüft, wie viel Wasser sich im Inneren des Schichtaufbaus ansammelt und vergleicht die Dampfdiffusionszyklen mit der Aufnahmefähigkeit des Schichtaufbaus. Bei so einer Vorgehensweise kann es durchaus auch zu Tauwasserbildung kommen. Wichtig ist, dass über das ganze Jahr betrachtet, zumindest die Menge an Wasser, die kondensiert auch wieder verdampfen kann.

Jedes Material weist eine bestimmte Aufnahmefähigkeit, die in den Normen festgehalten ist, auf.

Indem insgesamt ein „negativer Wasserhaushalt“ besteht, akzeptiert man die Bildung einer gewissen Menge an Tauwasser im Schichtaufbau. Je nach klimatischen Bedingungen und je nach Konstruktionsweise ist dies unvermeidbar. Wichtig ist aber, dass sich diese Menge innerhalb von vernünftigen Sicherheitslimits bewegt, d.h. genügend weit „entfernt“ ist von dem Grenzwert, den das Material noch aufnehmen kann.



DAMPFDROCKVERLAUF

[A]

Die Dicke der einzelnen Schichten ist maßstäblich abgestimmt auf den Sd-Wert jedes einzelnen Materials gezeichnet.

[B]

Der Maßstab der X-Achse richtet sich nach der Summe der Sd-Werte. Um das Diagramm für Schichtaufbauten mit einem hohen Diffusionswiderstand, wie z.B. Dampfsperren, sinnvoll darstellen zu können, war es notwendig die Y-Achse zu unterbrechen.

[C]

Der Dampfdruck wird in Pascal gemessen. Er wird im Innen- und im Außenraum von den jeweiligen klimatischen Bedingungen bestimmt. Die Werte, die im Inneren des Schichtaufbaus herrschen, werden von den Materialeigenschaften bestimmt. Ausgegangen wird von einer bestimmten Temperatur und einer relativen Luftfeuchtigkeit, woraus der Sättigungsdruck errechnet wird:

- für 20 °C, 100% rF (rel. Luftfeuchtigkeit): $P_{\text{sat}} = 2340 \text{ Pa}$;

- für -10 °C, 100% rF (rel. Luftfeuchtigkeit): $P_{\text{sat}} = 260 \text{ Pa}$

[Diagramm]

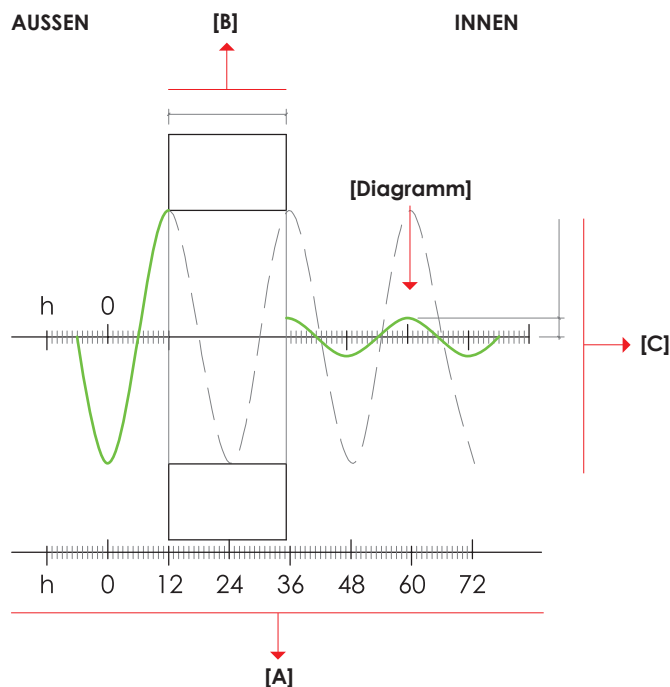
Das Diagramm wird auf den Temperaturverlauf abgestimmt. Ausgehend von den in Punkt [C] beschriebenen Rahmenbedingungen und 100% rF kann anhand der Temperaturen an den Übergängen zwischen den einzelnen Schichten der Sättigungsdruck bestimmt werden (rote Linie). Der Dampfdruckverlauf innerhalb der einzelnen Materialien (blaue Linie, die Werte beziehen sich auf Schichtübergänge) wird durch den Diffusionswiderstand und den real herrschenden Bedingungen, die normalerweise eine relative Luftfeuchtigkeit von weniger als 100% aufweisen, bestimmt. Befindet sich die Sättigungsdrucklinie immer über der Dampfdrucklinie, so ist der Schichtaufbau tauwasserfrei; ist das Gegenteil der Fall, d.h. die beiden Linien berühren sich bzw. der Sättigungsdruck ist an irgendeiner Stelle gleich dem tatsächlichen Dampfdruck, so besteht Tauwassergefahr.

6 · Thermische Analyse unter sommerlichen Bedingungen

Die thermische Analyse „unter sommerlichen Bedingungen“ beschäftigt sich mit zwei Eigenschaften, die im Wesentlichen die Empfindlichkeit des Bauteils auf Temperaturschwankungen vor allem durch die Sonneneinstrahlung beschreiben. Entsprechende Softwarepakete berechnen das Verhalten über eine „**Wärmeübergangsmatrix**“ aus den Werten für Dichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität der Materialien.

Die Definition dafür lautet gemäß EN ISO 13786:2007 Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren:

„Matrix, die die komplexen Amplituden von Temperatur und Wärmestromdichte an einer Seite eines Bauteils mit den komplexen Amplituden von Temperatur und Wärmestromdichte auf der anderen Seite verbindet.“



PHASENVERSCHIEBUNG UND AMPLITUDENDÄMPFUNG THERMISCHER WELLEN

[A]

Der Graph der Temperatur wird im Verhältnis zur Zeit aufgetragen. Auf diese Weise sind Leistungsunterschiede zwischen verschiedenen Bauteilen einfach zu erkennen.

[B]

Als Phasenverschiebung wird jene Zeit bezeichnet, die eine thermische Welle von der Außenfläche bis in den Innenraum benötigt. Angegeben wird sie in Stunden und Minuten.

[C]

Ein Temperaturamplitudenverhältnis TAV von 8% bedeutet z.B., dass die Temperaturschwankungen auf der Innenseite eines Schichtaufbaus 8% der Temperaturschwankungen der Außenseite, betragen; mit anderen Worten werden die äußeren Temperaturschwankungen um 92% reduziert.

[Diagramm]

Das Diagramm veranschaulicht die thermische Beanspruchung durch die Sonne und die Dämpfung durch die Eigenschaften des Schichtaufbaus. Die Sinuskurve zeigt die Temperaturschwankungen, die auf der Außenseite des Schichtaufbaus bestehen. Auf der linken Seite des Diagramms (später dann strichliert) sind die Temperaturschwankungen aufgrund der unterschiedlichen Sonneneinstrahlung im Laufe des Tages sehr groß. Auf der rechten Seite sind die Temperaturschwankungen durch den Widerstand, den das Bauteil der thermischen Welle entgegengesetzt, sehr klein.

Die Amplitudendämpfung beschreibt, wie das Bauteil auf die einwirkenden Temperaturschwankungen reagiert.

Je **größer** die Phasenverschiebung eines Bauteils ist, desto **länger** braucht eine thermische Welle, um es zu durchwandern, umso **weniger** Wärme schafft es bis auf die Innenseite des Bauteils zu gelangen und umso **kleiner** ist die Temperaturamplitude auf der Innenseite des Bauteils.

MODIFIZIERTE FOURIERZAHL

[A]

Der Schichtaufbau wird im Verhältnis zum f_0 -Wert dargestellt. Die Schichtdicke beschreibt dabei den Widerstand, den das jeweilige Material einer thermischen Welle entgegenstellt.

[B]

Die Leistungsfähigkeit des gesamten Elementes wird durch die Summe dieser Werte beschrieben: Das Ergebnis ist eine quantitative, keine qualitative Bewertung der Dämpfung.

[C]

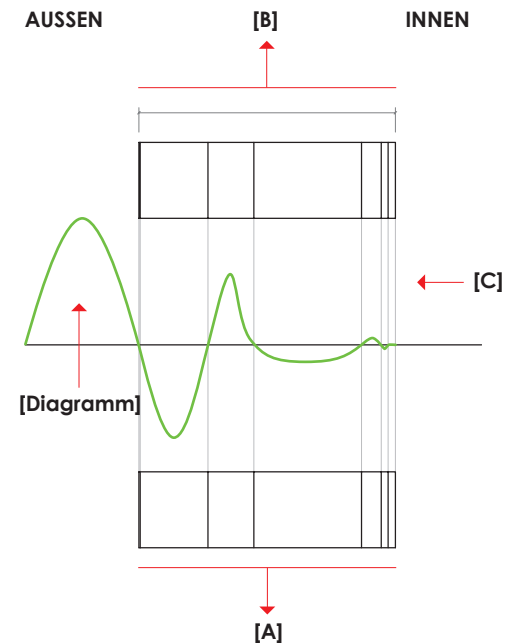
Die Prozentwerte beschreiben den Beitrag jedes einzelnen Materials zur Reduktion der thermischen Welle auf ihrem Weg durch den Schichtaufbau. Die Prozentwerte hängen von der modifizierten Fourierzahl ab und können je nach Positionierung des Materials im Schichtaufbau variieren.

[Diagramm]

Die Dämpfung der thermischen Welle ist für jedes Bauteil unterschiedlich. Jedes Element ist für sich aus verschiedenen Materialien unterschiedlicher Dichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität zusammengesetzt: Jede Materialschicht kann durch diese Eigenschaften, sowie durch ihre Dicke und Positionierung im Schichtaufbau zur Dämpfung und zur Phasenverschiebung einer thermischen Welle beitragen. Der Graph ist eine unregelmäßige Sinuskurve: Der Prozentwert beschreibt den Wert der Reduktion der Temperaturschwankung vom Außenbereich bis zum jeweiligen Material. Es handelt sich um eine schematische Darstellung die für eine qualitative Beurteilung ausreicht und die Wechselwirkung zwischen den Materialien anschaulich darstellt.

Vereinfacht gesagt ist es nützlich, zu verstehen, welche Position die einzelnen Materialien aufgrund ihrer Eigenschaften einnehmen sollen: Ein außen angebrachter Dämmstoff hat bei der Dämpfung sommerlicher thermischer Beanspruchung ein anderes Gewicht als eine Innendämmung.

Auch in diesem Fall spielt der Standort keine Rolle, da die Werte von den physikalischen Eigenschaften bestimmt werden.



Klimabezogene Analyse der Baustoffe

Angesichts der Tatsache, dass sich Italien durch eine Vielzahl sehr unterschiedlicher klimatischer Bedingungen auszeichnet, wurden die einzelnen Gemeinden im Zuge der zweiten Wärmeschutzverordnung (Legge 10 von 1991), in **sechs Klimazonen** eingeteilt. Ausgehend von den Heizgradtagen jeder Ortschaft bezeichnet dabei Klimazone A die Zone mit den mildesten, F hingegen die mit den strengsten Wintern.

Aus diesem Grund trug die **Wärmedämmung** der Gebäude bisher ausschließlich dem Schutz vor Kälte und dem winterlichen Wohlbefinden Rechnung, ohne auf die sommerlichen Bedingungen Rücksicht zu nehmen. Dies mag für Bergregionen mit strengen Wintern und milden Sommern passend sein. In heißen und feuchtheißen Zonen spielt aber die Kühlung eine wesentliche Rolle für das Wohlbefinden der Bewohner und stellt gleichzeitig einen Hauptverursacher des Energieverbrauchs dar.

Eine Wärmedämmung mit geeigneter Dicke, die gut vor Kälte schützt, muss nicht unbedingt einen ausreichenden Schutz gegen Hitze bieten, da die Materialien aufgrund ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften nicht immer beide Aufgaben gleichermaßen erfüllen können. Ein korrekter Planungsansatz muss den Standort und den spezifischen klimatischen Kontext mit einbeziehen, um dann geeignete Strategien für ein angenehmes Raumklima zu entwerfen.

Sobald die Tragkonstruktion des Gebäudes definiert ist, muss die Rolle der Gebäudehülle untersucht werden. Die Außendämmung stellt die „Haut“ des Hauses dar und trägt durch die Erhaltung einer möglichst gleichmäßigen Innentemperatur im Gegensatz zu einer schwankenden Außentemperatur maßgeblich zum Wohlbefinden im Gebäude bei. Dieses Ziel kann nur durch eine intensive Auseinandersetzung mit den Dämmstoffen erreicht werden, aus denen dann der jeweils geeignetste für die herrschenden Bedingungen gewählt werden muss. **Gute Wärmedämmung kann nie beliebig sein, sondern muss sich immer auf den jeweiligen Ort, die jeweilige Zone und das jeweilige Klima beziehen.**

Diese Überlegungen bildeten den Ausgangspunkt für die Analyse von Aufbauten und Details. Dabei wurde untersucht, wie sich die einzelnen Werte bei Änderung des Dämmstoffes im Schichtaufbau ändern. Das Ergebnis dieser Untersuchungen, die sich ausschließlich auf Bauteile der Außenhülle und nicht auf Decken und Wände im Gebäudeinneren bezog, listet unterschiedliche Werte wie Wärmedurchgangskoeffizient/ Wärmedurchgangswiderstand, thermische Phasenverschiebung/ Temperaturamplitudenverhältnis auf und kann damit, abhängig von der Klimazone, eine Entscheidungshilfe sein: Einige Materialien eignen sich besser zum Schutz vor Kälte, andere sind in warmen Klimazonen vorzuziehen und bei wieder anderen stellte sich heraus, dass sie beiden Fällen gerecht werden.

Für jeden Aufbau konnten etwa **sieben bis acht Dämmstoffe** verglichen werden, die sich für die jeweilige Anwendung als mehr oder weniger passend erwiesen. Einige spezifische Eigenschaften wurden dabei mittels Software (in diesem Fall „Dämmwerk“) untersucht und dann einander gegenübergestellt. Die Untersuchung eines einzelnen Elementes, das nicht in seinen Kontext mit Fenstern, Türen und Orientierung eingebunden ist, kann nicht die gleichen Ergebnisse wie die Untersuchung am tatsächlich eingebauten Element liefern. Die hier verfolgten Ziele konnten aber mit den ermittelten Werten erreicht werden.

Nach jedem Kapitel findet sich abschließend eine Tabelle mit dem genauen Schichtaufbau, der analysiert wurde; der Dämmstoff ist dabei rot hervorgehoben. In der Tabelle sind alle untersuchten Materialien mit ihren Werten und ihrer Eignung für die unterschiedlichen Klimazonen (durch farbliche Kennzeichnung leicht erkennbar) angeführt.

(Auf der folgenden Seite findet sich ein Beispiel einer solchen Tabelle).

AUSSENWAND	flächenbezogene Masse des Bauteils (kg/m ²)	Wärmedurchgangswiderstand (m ² K/W)	Wärmedurchgangskoeffizient (W/m ² K)	Temperaturamplitudenverhältnis (TAV)	Phasenverschiebung (h)	Dampfdiffusionsverhalten	Eignung für die jeweilige Klimazone					
Holzfasern	147,40	6,450	0,155	0,24%	22h42'	geeignet	A	B	C	D	E	F
Glaswolle	113,60	5,800	0,172	0,50%	16h42'	geeignet				D	E	F
Hanf	113,90	6,330	0,158	0,38%	18h48'	geeignet			C	D	E	F

Beispiel: Ganz links stehen die ausgewählten Materialien, anschließend die Werte des einzelnen Materials und zum Schluss eine Bewertung, wie gut es sich für die verschiedenen Klimazonen eignet.

Die untersuchten Parameter, die bereits auf den vorhergehenden Seiten eingehend beschrieben wurden, sind: **flächenbezogene Masse, Wärmedurchgangswiderstand, Wärmedurchgangskoeffizient, Temperaturamplitudenverhältnis TAV, Phasenverschiebung und Dampfdiffusionsverhalten**. Aus diesem Vergleich und der Untersuchung des Verhaltens des jeweiligen Bauteils zeigt sich, für welche italienischen Klimazonen sich das Bauteil eignet. Diese Empfehlung fußt vor allem auf dem Vergleich der Ergebnisse untereinander und nicht so sehr auf den absolut ermittelten Werten. Diese könnten durchaus für alle Klimazonen geeignet erscheinen.

Das Dampfdiffusionsverhalten beschreibt die Wahrscheinlichkeit von Tauwasserbildung im Bauteil: Der Dampfdrucknachweis ist für ein mehrschichtiges Bauteil von großer Bedeutung, da eine nur näherungsweise Überprüfung, welche nicht die Durchlässigkeit der einzelnen Schichten in ihrer festgesetzten Reihenfolge berücksichtigt, zu Feuchteschäden führen kann. Der Diffusionswiderstand sollte möglichst von innen nach außen hin abnehmen: Einmal im Element vorhandener Wasserdampf sollte auf seinem Weg nach außen nicht behindert werden. Die UNI EN ISO 13788-Norm erlaubt bis zu 500g/m² an Tauwasser, vorausgesetzt wenn nachgewiesen werden kann, dass diese Menge während des Sommers wieder verdunstet.

Es zeigte sich, dass alle angeführten Schichtaufbauten ein geeignetes Dampfdiffusionsverhalten aufweisen, da sich im Bauteilinneren keine Feuchtigkeit bildete. Zurückzuführen ist dies auf den sorgfältig durchdachten Schichtaufbau und die Eignung der analysierten Materialien für diesen Bereich: Zweifelsohne ist die Überprüfung des Dampfdiffusionsverhaltens bereits während der Planungsphase notwendig, um zu gewährleisten, dass der

geplante Aufbau auch geeignet ist.

Wärmeleitfähigkeit und Widerstand haben im Winter große Bedeutung (je kleiner der Wärmedurchgangskoeffizient U bzw. je größer der Wärmedurchgangswiderstand R, desto geringer der Wärmeverlust). Mit einem durchgehenden Wärmedämmverbundsystem im Außenbereich kann das Gebäude effizient und vollflächig ohne Wärmebrücken gedämmt werden. Im Gegensatz dazu sind im Sommer jene Werte wichtig, die mit flächenbezogener Masse und Speicherfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit verbunden sind, also die Phasenverschiebung und das Temperaturamplitudenverhältnis TAV. Je mehr der Wärmedurchgang nach innen verzögert und die Wärmeamplitude gedämpft wird, desto weniger wird das Innenraumklima von den hohen Außentemperaturen beeinflusst. Die Phasenverschiebung führt dazu, dass die Wärme in den kühleren Nachtstunden den Innenraum erreicht, wo sie erträglicher ist, bzw. Durch Lüften wieder abgeführt werden kann.

Die Dämmstoffe können, je nachdem, welche Eigenschaften man hervorstreichen möchte, nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden: nach ihrem **Ursprung** (pflanzlicher oder tierischer Herkunft, synthetisch oder mineralisch), nach ihrer **Struktur** (faser- oder zellartig), ihrer **Zusammensetzung** (organisch oder anorganisch) oder nach ihrer **Umweltverträglichkeit**. Die „ökologische Bilanz“ eines Produktes spiegelt seine Umweltverträglichkeit auf unterschiedlichen Ebenen wider: Die verwendeten Rohstoffe, Fertigung, Transportwege, Nutzung und Entsorgung, der Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastung, die im Lebenszyklus eines Produktes auftreten.

Der Rückgang der fossilen Rohstoffe bringt die Notwendigkeit mit sich, alternative Produkte zu nutzen, die nicht fossiler