

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Raumklimatisierung durch thermisch aktivierte Massivholzelemente –
Konzeptentwicklung, Leistungsbetrachtung und Ableitung von Auslegungswerkzeugen

Klaus Mindrup

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Werner Lang

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
2. Prof. Thomas Auer
3. Hon.-Prof. Dr.-Ing Hartwig Künzel

Die Dissertation wurde am 28.03.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und
durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 10.12.2019 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis meiner mehrjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München.

Ein großer Teil dieser Arbeit ist im Rahmen des Forschungsprojektes: ‚Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierbare Massivholzelemente‘ erstellt worden. Dieses Projekt wurde durch Zuwendungen der Forschungsinitiative ZukunftBAU des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) ermöglicht. Daneben wurde ein wichtiger Beitrag seitens der Binderholz GmbH durch die Bereitstellung von Material, die Möglichkeit ihre Produktionsanlagen nutzen zu dürfen sowie durch zahlreiche Diskussionen und hilfreiche Anregungen geleistet. Hierfür möchte ich stellvertretend Herrn Dipl.-Forstwirt (univ.) Christof Richter großen Dank aussprechen.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter für das entgegengebrachte Vertrauen und für seine inspirierende Offenheit interdisziplinären Themen gegenüber. Ohne die fachübergreifende Expertise und ohne die technische Infrastruktur des von ihm geleiteten Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion wäre die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Für die Übernahme des Koreferates und die konstruktiven Ratschläge während der Bearbeitung danke ich Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer.

Ebenso richte ich meinen herzlichen Dank an Herrn Hon.-Prof. Dr.-Ing Hartwig Künzel.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Lang danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission, die zügige Abwicklung des Promotionsverfahrens sowie die zahlreichen von ihm ausgehenden Impulse, die während meiner bei ihm genossenen akademischen Ausbildung wegweisend waren.

Danken möchte ich auch allen Studierenden, die durch eine engagierte Bearbeitung ihrer Abschlussarbeiten einen substanziellen Anteil am Ergebnis dieses Forschungsprojektes halten.

Meinen herzlichsten Dank möchte ich meiner Familie, meinen Vertrauten, Freunden und Arbeitskollegen widmen. Sie gewährten mir jederzeit das Verständnis, die Unterstützung und den Zuspruch, ohne diese die Fertigstellung der Arbeit nicht gelungen wäre.

München, 20.01.2020

Kurzfassung

In den zurückliegenden zwanzig Jahren hat die konstruktive Verwendung des nachwachsenden Rohstoffs Holz eine bemerkenswerte Entwicklung durchlaufen. Ermöglicht wurde dies maßgeblich durch die Einführung innovativer Produkte wie dem Brettsperrholz. Wichtige Potenziale der Brettsperrholzbauweise sind der hohe Grad an werkseitiger Vorfertigung und, dadurch ermöglicht, die schnelle Montage und hohe Ausführungsqualität auf der Baustelle. Vielfach kann durch die Verwendung von Brettsperrholzelementen der Einbau zusätzlicher Funktionsschichten, wie dampfbremssende Folien oder brandschutzwirksame Kapselungen, entfallen. Ein weiterer Schritt dieser Entwicklung ist die Integration von raumklimakonditionierenden Funktionen. Nach der Errichtung des Rohbaus soll mit funktional erweiterten Brettsperrholzprodukten auch die Ausbauphase eines Gebäudes beschleunigt werden, indem weiterer Montageaufwand von der Baustelle in die werkseitige Vorfertigung verlagert wird.

In der vorliegenden Arbeit wird ein in Brettsperrholzelemente integriertes Heiz- und Kühlsystem entwickelt. Es werden die notwendigen technischen und wissenschaftlichen Grundlagen geschaffen, um eine auf der Arbeit aufbauende herstellereigenspezifische Produktentwicklung zu ermöglichen. Das entwickelte System wird für die bauliche Umsetzung auslegbar und somit versorgungstechnisch verwendbar gemacht. Das bauteilintegrierte Heiz- und Kühlsystem wird dem Begriff ‚thermisch aktiviertes Bauteil‘ zugeordnet und fortan als ‚thermisch aktiviertes Massivholzelement‘ bezeichnet.

Die Arbeit ist geprägt von einer hohen Interdisziplinarität der zu lösenden Probleme. Schwerpunktmäßig ist sie den Fachbereichen der thermisch-hygrischen Bauphysik, dem konstruktiven Holzbau und der Raumklimatechnik zuzuordnen. Der Interdisziplinarität des Themas entsprechend ist die einführende Grundlagendiskussion umfangreich. Auf diese folgt eine Konzeptentwicklung für ‚thermisch aktivierte Massivholzelemente‘. Das entwickelte Systemkonzept wird auf Bauteilebene, auf Raumebene und auf Gebäudeebene vorgestellt und diskutiert. Für die experimentelle Untersuchung werden zwei Prototypen entworfen und produziert. Die Herstellung erfolgt auf praxisüblichen Brettsperrholz-Produktionsanlagen des beteiligten Industriepartners, um eine Aussage über die Herstellbarkeit des Systems zu erhalten. Nach Fertigstellung der Prototypen wird der durchlaufene Herstellungsprozess evaluiert. Daraus folgend werden Optimierungsvorschläge erarbeitet und diskutiert.

Im Rahmen von Langzeitlaborversuchen werden die Prototypen hinsichtlich ihrer stationären und instationären thermischen Leistungsfähigkeit untersucht. Parallel werden limitierende Faktoren, wie die Entwicklung der Holzfeuchte im Heiz- und im Kühlbetrieb und daraus resultierende Quell- und Schwindverformungen, überwacht. Mithilfe der Messdaten werden thermodynamische Berechnungsmodelle des Systems entwickelt und validiert.

Die validierten Berechnungsmodelle dienen einer thermischen Leistungsbetrachtung auf Bauteilebene und auf Raumebene. Auf Bauteilebene wird das entwickelte System zwei etablierten Flächenheiz- und Kühlsystemen gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit den hergestellten Prototypen ca. 65 % der thermischen Leistung der Referenzsysteme erreicht werden kann.

Auf Raumebene wird das System mittels numerischer Simulation in einem virtuellen, repräsentativen Anwendungsszenario getestet. Die Ergebnisse der Simulation bestätigen, dass die bisher erreichte Leistung der thermisch aktivierten Massivholzelemente für die ganzjährige Raumklimakonditionierung des repräsentativen Einsatzszenarios ausreichend ist. Vorschläge für die weitergehende Leistungsoptimierung werden im Rahmen der Arbeit unterbreitet.

Zur Bemessung des Systems für reale Einsatzszenarien werden unterschiedliche, in der Praxis etablierte Auslegungswerkzeuge erarbeitet. Diese ermöglichen erstens eine stationäre Auslegung mittels Diagrammverfahren und zweitens eine instationäre Auslegung mittels thermischer Gebäudesimulation.

Stichworte

Massivholzbauweise, Brettsperrholz, Brettsperrholzherstellung, Sichtholzoberflächen, Flächenheizsystem, Flächenkühlsystem, thermisch aktivierte Bauteile, thermisch aktivierte Massivholzelemente, thermische Behaglichkeit, thermische Gebäudesimulation, Modellvalidierung, Wärmeübergangskoeffizienten, Holzfeuchte

Abstract

'Room climate conditioning using thermally activated solid timber elements -

Concept development, performance analysis and derivation of design tools'

Building construction utilizing timber as a renewable raw material has been undergoing a remarkable development during the past twenty years. The introduction of innovative products such as cross-laminated timber (CLT) contributed significantly to this trend. One considerable benefit of CLT-construction is the high degree of prefabrication. Transferring the element production to the manufacturing plants helps to speed up the structural work on site and improves the quality of execution. Furthermore, the use of cross-laminated timber panels may eliminate the need for additional functional layers, such as vapour retardant foils or fire protecting encapsulation.

A next step in this development suggests the integration of active room climate conditioning functions into CLT-elements. Thus, after erection of the shell structure of a building, the finishing of the interior can also be accelerated and qualitatively improved.

The subject of this thesis is the development of a heating and cooling system being integrated into cross-laminated timber elements. Necessary technical and scientific foundations are explained to enable a manufacturer-specific product development. The work is characterized by its high degree of interdisciplinary problems to be solved. Hereby, it focuses on the fields of thermal-hygric building physics, structural timber construction and indoor climate technology.

The introductory basic discussion is followed by a concept development for 'thermally activated solid timber elements'. The developed system concept is presented and discussed at component level, at room level and at building level. Two prototypes were designed and produced for the executed experimental investigation. The production process was composed for standard CLT-production plants of the participating industrial partner in order to obtain a statement about the manufacturability of the system. After completion of the prototypes, the manufacturing process was evaluated. Based on this, optimization proposals were developed and discussed.

The stationary and transient thermal performance of the prototypes was investigated during long-term laboratory tests. In parallel, limiting factors such as the changing wood moisture conditions in heating and cooling mode and the resulting swelling and shrinkage deformations were monitored. With the help of the measurement data, thermodynamic calculation models of the system were developed and validated.

The validated calculation models were then used for a thermal performance analysis at component level and at room level. At component level, the developed system was compared to two established surface heating and cooling systems. Results showed that the manufactured prototypes are performing at approximately 65 % of the thermal performance of the reference systems. At room level, the system was tested by means of numerical simulation in a virtual, representative application scenario. The simulation confirmed that the so far achieved performance of the thermally activated CLT elements is sufficient for a year-round room climate conditioning of the representative application scenario.

Performance parameters of the developed system are hence provided for system planners in praxis to enable dimensioning of systems in concrete application scenarios using established design tools.

The work concludes with suggestions for improvements, which can be investigated in future research to further optimize the thermal performance and application maturity of comparable systems.

Keywords:

Solid timber construction, cross-laminated timber, cross-laminated timber production, exposed wood surfaces, surface heating system, surface cooling system, thermally activated components, thermally activated solid timber elements, thermal comfort, thermal building simulation, model validation, heat transfer coefficients, wood moisture content

Inhaltsverzeichnis

Symbole und Abkürzungen	i
1 Einleitung.....	1
1.1 Die Ausgangssituation der Entwicklung thermisch aktivierter Massivholzelemente	1
1.2 Raumklima von Massivholzgebäuden.....	3
1.3 Exkurs zur nachhaltigen adaptiven Energieversorgung von Gebäuden	7
1.4 Ziele der Arbeit und Abgrenzung des Untersuchungsumfangs	8
1.5 Aufbau der Arbeit und methodisches Vorgehen.....	8
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	10
2.1 Der Werkstoff Holz – eine Betrachtung auf Materialebene.....	10
2.1.1 Erklärungsansatz.....	10
2.1.2 Mikroskopischer Aufbau	10
2.1.3 Makroskopischer Aufbau	13
2.2 Bauen mit Brettsperrholz – eine Betrachtung auf Produktebene.....	16
2.2.1 Entwicklung	16
2.2.2 Herstellungsprozess	17
2.2.3 Nachhaltigkeit.....	18
2.3 Hygrische Eigenschaften und Vorgänge von Brettsperrholz	19
2.3.1 Einheiten der Holzfeuchte.....	19
2.3.2 Bereiche der Holzfeuchte.....	21
2.3.3 Mechanismen der Feuchtebindung im Holz	24
2.3.4 Mechanismen des Feuchtetransports im Holz	27
2.3.5 Hygrothermische Pufferwirkung von Holzwerkstoffen – der ‚Latentwärmeeffekt‘	32
2.4 Thermische Vorgänge und Eigenschaften von Holz	35

2.4.1	Erläuterung zum Aufbau des Kapitels	35
2.4.2	Mechanismen des Wärmetransportes	35
2.4.3	Wärmeleitung	37
2.4.4	Konvektion.....	42
2.4.5	Strahlung.....	51
2.4.6	Gesamtwärmeübergangskoeffizient von thermisch aktiven Flächen gemäß Basiskennlinie	55
2.4.7	Exkurs: Abgeleitete thermische Bewertungskennzahlen für instationäre Wärmeleitung	58
2.5	Raumklima und thermische Behaglichkeit	61
2.5.1	Bewertungsgrößen des Raumklimas	61
2.5.2	Verfahren zur Bewertung des Raumklimas.....	62
2.6	Raumklimatisierung über flächige/bauteilintegrierte Heiz- und Kühlsysteme	68
2.6.1	Begriffsdefinition	68
2.6.2	Anforderungen der thermischen Behaglichkeit an thermisch aktivierte Raumflächen	68
2.6.3	Historische Betrachtung der thermischen Bauteilaktivierung.....	74
2.6.4	Voraussetzungen und Planungskriterien für thermoaktive Bauteilsysteme	77
3	Konzept der thermisch aktivierten Massivholzelemente.....	79
3.1	Systemtheoretische Einordnung.....	79
3.2	Konzeptvorstellung.....	80
3.2.1	Konzeptstruktur	80
3.2.2	Konzept auf Bauteilebene.....	80
3.2.3	Konzept auf Raumebene	82
3.2.4	Konzept auf Gebäudeebene	87
3.3	Entwicklungsparameter	89

3.3.1	Allgemein.....	89
3.3.2	Überblick und Eingrenzung der Variationen.....	89
3.3.3	Wahl des Wärmeüberträgermediums.....	90
3.3.4	Arrangement der Luftkanäle	98
3.3.5	Lagetiefe der Luftkanäle	100
4	Experimentelle Untersuchungen.....	103
4.1	Produktion prototypischer Probekörper.....	103
4.1.1	Produktionskonzept	103
4.1.2	Bemaßung.....	104
4.1.3	Produktionsprozess	106
4.1.4	Ex post Bewertung des Herstellungsprozesses	110
4.2	Versuchskonfiguration	115
4.2.1	Ziele der Laborversuche und methodisches Vorgehen	115
4.2.2	Versuchskonfiguration	116
4.2.3	Laborumgebung	122
4.3	Versuchsergebnisse.....	124
4.3.1	Hinweise zur Darstellung der Messdaten.....	124
4.3.2	Thermische Leistung	128
4.3.3	Materialfeuchte	135
4.3.4	Aerodynamische Analyse	143
5	Berechnungsansätze zur Beschreibung der thermischen Leistung.....	149
5.1	Praxisübliche Berechnung und Auslegung von Flächenheiz- und Kühlsystemen.....	149
5.1.1	Allgemein.....	149
5.1.2	Stationäre Ansätze zur Auslegung von Flächenheiz- und Kühlsystemen.....	149

5.1.3	Instationäre Ansätze	154
5.2	Numerische Modellierung eines thermisch aktivierten Massivholzelements	155
5.2.1	Allgemein.....	155
5.2.2	Thermodynamische Vorgänge am thermisch aktivierten Massivholzelement...	156
5.2.3	Die Simulationsumgebung	157
5.3	Modellvalidierung	167
5.3.1	Begriffsdefinition	167
5.3.2	Messdatenabgleich.....	167
5.3.3	Ergebnisse des Messdatenabgleichs.....	168
6	Leistungsbetrachtung thermisch aktivierter Massivholzelemente.....	173
6.1	Erläuterung zur Struktur der Leistungsbetrachtung.....	173
6.2	Leistungsgrenzen	173
6.2.1	Stationärer Ansatz zur Bestimmung von holzfeuchtebedingten Leistungsgrenzen.	173
6.2.2	Instationärer Ansatz zur Bestimmung von holzfeuchtebedingten Leistungsgrenzen	176
6.3	Leistungsbetrachtung auf Bauteilebene.....	180
6.3.1	Erläuterung zum Aufbau des Abschnitts	180
6.3.2	Prototyp A eines thermisch aktivierten Massivholzelements	180
6.3.3	Prototyp B eines thermisch aktivierten Massivholzelements	181
6.3.4	Referenzsystem A – Lehmputz-Wandheizung Nass	182
6.3.5	Referenzsystem B – Trockenbau Wandheizung mit Wärmeleitblechen	183
6.3.6	Leistungsvergleich auf Basis des Auslegungsdiagramms.....	184
6.4	Leistungsbetrachtung auf Raumebene	187
6.4.1	Beschreibung des Referenzszenarios für die Leistungsbetrachtung auf Raumebene.....	187

6.4.2	Standortklimadaten.....	191
6.4.3	Ergebnisse der Raumklimasimulation.....	191
6.5	Optimierungsvorschlag für den Bau weiterer Prototypen.....	194
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	196
7.1	Ergebniszusammenfassung und Diskussion.....	196
7.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf.....	198
8	Literaturverzeichnis.....	200
9	Abbildungsverzeichnis.....	214
10	Tabellenverzeichnis.....	223
11	Anhang.....	225

Symbole und Abkürzungen

Große lateinische Buchstaben

A	Fläche	m^2
B	Breite	m
D_φ	Flüssigleitkoeffizient	kg/ms
D	Außendurchmesser	m
F_C	Abmilderungsfaktor für transmittierte Solarstrahlung	-
Gr	Grashof-Zahl	-
H	Höhe	m
H	Enthalpie	J
I	flächenspezifische kurzwellige Einstrahlung	W/m^2
I_{tot}	flächenspezifische kurzwellige Totalstrahlung	W/m^2
L	Länge	m
Nu	Nußelt Zahl	-
P	Leistung	W
P	Druck	Pa
P_D	Wasserdampfpartialdruck	Pa
P_{sat}	Sättigungsdampfdruck	Pa
P_{out}	spezifischer konvektiver- kurz- und langwellig-radiativer Wärmestrom	W/m^2
Pr	Prandtl-Zahl	-
Q	volumenbezogenen Wassergehalt	kg_{H_2O} / m^3_{Holz}
Q	Energiemenge	J
Q_{ABSI}	kurz- und langwellig-radiativer Wärmestrom, ausgenommen des Strahlungsaustauschs mit anderen raumseitigen Wandoberflächen	$W; kJ/h$
Q_{COMI}	kombinierter konvektiver und langwellig-radiativer Wärmestrom zwischen den raumseitigen Wandoberflächen eines Raumes	$W; kJ/h$
R	Bestimmtheitsmaß	-
R	thermischer Widerstand	m^2K/W
Ra	Rayleigh-Zahl	-
Re	Reynolds-Zahl	-
$R_{f_{sol}}$	Reflektivität für Solarstrahlung	-
R_{SE}	Gesamtwärmeübergangswiderstand außen	m^2K/W
R_{SI}	Gesamtwärmeübergangswiderstand innen	m^2K/W
S	hygroskopisch aktive Fläche	m^2
T	Temperatur	$^\circ C, K$
T_{ob}	gemittelte Temperatur der aktiven Oberfläche	$^\circ C$
T_g	Schwarzkugeltemperatur	$^\circ C$
T_L	Temperatur der Raumluft	$^\circ C$
T_{op}	operative Temperatur	$^\circ C$
$T_{b,op}$	Bezugswert der operativen Temperatur nach DIN 4108-2	$^\circ C$

T_{out}	Außenlufttemperatur	°C
T_r	Strahlungstemperatur	°C
t_T	Taupunkttemperatur	°C
U	innere Energie	J
V	Volumen	m^3
\dot{W}	Arbeitsstrom \triangleq Leistung $P(t)$	W

Kleine lateinische Buchstaben

a	Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
b	Wärmeeindringkoeffizient	$J/m^2K s^{1/2}$
c	Geschwindigkeit	m/s
c	spezifische Wärmekapazität	J/kgK
c_{CO_2}	Stoffmengenkonzentration an CO_2	ppm
c_p	isobare spezifische Wärmekapazität	J/kgK
d	Schichtstärke	m
d_h	hydraulischer Durchmesser	m
f_H	Temperaturkorrekturfaktor für den Heizbetrieb	-
f_K	Temperaturkorrekturfaktor für den Kühlbetrieb	-
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
g_{LT}	vertikaler Lufttemperaturgradient	K/m
g_z	spezifische potenzielle Energie	J/kg
\dot{g}_v	Wasserdampfdiffusionsstromdichte	kg/m^2s
\dot{g}_w	Flüssigtransportstromdichte	kg/m^2s
h	Höhe	m
h	spezifische Enthalpie	kJ/kg
h_r	radiativer Wärmeübergangskoeffizient	W/m^2K
h_c	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	W/m^2K
l	charakteristische Länge	m
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
n	Luftwechselrate	h^{-1}
\dot{q}	Spezifische Wärmestromdichte	W/m^2
s	Wärmespeicherzahl	J/m^3K
t	Zeit	s
u	Holzfeuchte	Massen-%
v	Geschwindigkeit	m/s
x	absoluten Feuchte	g/kg
x, y, z	kartesische Koordinaten	m

Griechische Buchstaben

α	Absorptivität	-
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/m^2K
β	Ausdehnungskoeffizient	$1/K$
δ	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft	$kg/msPa$
δ_t	Strahlungstemperatursymmetrie	K
ε	Emissionsgrad	-
η	dynamische Zähigkeit / Viskosität	$Pa\ s$
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
λ	Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung	μm
ν	kinematische Zähigkeit	m^2/s
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	W/m^2K^4
φ	relative Luftfeuchte	%
ρ	Reflektivität	-
ρ	Rohdichte	kg/m^2
τ	Transmissivität	-
T_{sol}	Transmissivität für Solarstrahlung	-
T_{vis}	Transmissivität für Strahlung im sichtbaren Spektrum	-
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	-
ω	Wassergehalt	Massen-%

Indices

<i>AW</i>	Außenwand
<i>DH</i>	Deckenheizung
<i>DK</i>	Deckenkühlung
<i>dtr</i>	darrtrocken
<i>F</i>	Fluid
<i>FBH</i>	Fußbodenheizung
<i>FBK</i>	Fußbodenkühlung
<i>IW</i>	Innenwand
<i>k</i>	konvektiv
<i>r</i>	radiativ
<i>S</i>	Oberfläche (engl. Surface)
<i>u</i>	Holzfeuchte
<i>W</i>	Wasser

Abkürzungen

<i>abZ</i>	<i>allgemeine bauaufsichtliche Zulassung</i>
<i>BSP</i>	<i>Brettsperrholz</i>
<i>clo</i>	<i>Clothing-Factor; engl. für Bekleidungsgrad</i>
<i>CLT, X-Lam</i>	<i>Cross Laminated Timber; engl. für Brettsperrholz</i>
<i>DIBT</i>	<i>Deutschen Instituts für Bautechnik</i>
<i>DP</i>	<i>Datenpunkt</i>
<i>EDV</i>	<i>Elektronische Datenverarbeitungsgeräte</i>
<i>ETA</i>	<i>European Technical Approval; engl. für Europäische Technische Zulassung</i>
<i>GEG</i>	<i>Gesetzes zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden</i>
<i>HF</i>	<i>Holzfeuchte</i>
<i>HVAC</i>	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning; engl. für Heizung, Lüftung, Klimatechnik</i>
<i>met</i>	<i>metabolische Rate</i>
<i>MVV-TB</i>	<i>Musterverwaltungsvorschrift für Technische Baubestimmungen</i>
<i>NV</i>	<i>Natural ventilated; engl. für ‚Natürlich belüftet‘</i>
<i>OSB</i>	<i>oriented strand board; engl. Für Grobspanplatte (OSB-Platte)</i>
<i>PD</i>	<i>Percentage of Dissatisfied; engl. für ‚Prozentsatz an Unzufriedenen‘</i>
<i>PID</i>	<i>Proportionaler, integraler und derivativer Regelungsalgorithmus</i>
<i>PMV</i>	<i>Predicted Mean Vote; engl. für Mittleres vorhergesagtes Meinungsvotum</i>
<i>PPD</i>	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied; engl. für ‚Prozentsatz an Unzufriedenen‘</i>
<i>PUR</i>	<i>Polyurethanklebstoff</i>
<i>RLT-Anlage</i>	<i>Raumluftechnische Anlage</i>
<i>Seg</i>	<i>Segment</i>
<i>SSV</i>	<i>Sonnenschutzverglasung</i>
<i>TGA</i>	<i>Technische Gebäudeausrüstung</i>
<i>TRY</i>	<i>Testreferenzjahr</i>
<i>UF</i>	<i>Harnstoff-Formaldehydharzklebstoff</i>
<i>VLT</i>	<i>Vorlauftemperatur</i>

Operatoren

Δ	Änderung
∂	<i>partielles Differenzial</i>
∇	<i>Nabla-Operator</i>
\perp	<i>orthogonal</i>
\parallel	<i>parallel</i>
Σ	<i>Summe</i>

1 Einleitung

1.1 Die Ausgangssituation der Entwicklung thermisch aktivierter Massivholzelemente

Massivholzkonstruktionen gewinnen in den letzten Jahren bei Bau, Ausbau und Instandsetzung von Wohn- sowie Nichtwohnmobilien stetig an Bedeutung. Dieser Entwicklung sind intensive Forschungstätigkeiten vorangegangen, auf deren Grundlage die konstruktiven Möglichkeiten von Holzbausystemen erweitert und mehrgeschossiges Bauen bis über die Hochhausgrenze hinaus in Pilotprojekten mit Massivholzkonstruktionen möglich wurde. Mit industriell vorgefertigten massiven Holzelementen lassen sich kurze Errichtungszeiten durch hohe Vorfertigungsgrade und sehr hohe Ausführungsqualitäten erzielen. Bei vielen Projekten mangelt es jedoch an einer effizienten und frühen Integration der technischen Gebäudeausrüstung in das Bausystem. Häufig folgt auf eine nur wenige Tage dauernde Errichtung des Rohbaus eine Wochen oder gar Monate in Anspruch nehmende Ausbauphase bis zur Fertigstellung des Gebäudes. Bauparallele Planung der technischen Gebäudeausrüstung, wie sie in der konventionellen Baupraxis regelmäßig stattfindet, funktioniert im Holzbau nicht (Geier et al. 2017). Schließlich wird ein Großteil der technischen Installationen bereits während der Vorfertigung im Werk des Holzbauunternehmens in die Konstruktion eingebracht. Tragende Holzbauelemente müssen ab der Gebäudeklasse vier aufgrund der aktuellen Brandschutzanforderungen und der Vorgabe der Muster-Verwaltungsvorschrift für Technische Baubestimmungen (MVV-TB) in Deutschland meist gekapselt zur Baustelle geliefert werden. Ein nachträgliches Einbringen technischer Installationen, wie im Massivbau üblich, ist aus diesen Gründen in vielen Holzbauprojekten nicht mehr möglich und auch nicht zielführend. Schlitz- und Durchbrucharbeiten für technische Installationen sollten, soweit möglich, in die werkseitige Vorfertigung verlagert werden. Auf diese Weise lassen sich die multidisziplinären Anforderungen an die integralen Teile der Konstruktion in gleichbleibender Qualität realisieren und auch kontrollieren. Für den Objektplaner der Haustechnik werden die Anforderungen aus Brand-, Schall-, Wärme- und Feuchteschutz sowie der Tragwerksplanung zunehmend komplexer. Im Tagesgeschäft des Haustechnikplaners nimmt bei Holzbauprojekten die Recherche nach funktional geeigneten Produkten mit hinreichenden bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweisen überproportional viel Zeit in Anspruch¹. Eine breite Abdeckung mit Verwendbarkeitsnachweisen für holzbauspezifische Produkte der Haustechnik, wie Befestigungsmitteln oder Schottungen, liegt im Vergleich zum Massivbau noch nicht vor. Problematisch wird diese planerische Vorgehensweise vor allem dann, wenn sie für eine

¹ Diese Aussage begründet sich auf der Erfahrung des Autors, die dieser auf eine, zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Textes, mehrjährige Tätigkeit als Haustechnikplaner im Holzbau stützt. Beispiele hierfür sind elektrotechnische Installationsdosen, Brandabschottungen bei der Durchdringung raumabschließender Bauteile oder die schallentkoppelnde mechanische Verankerung von Sanitärinstallationen an Massivholzbauteilen.

Vielzahl von Einzelprodukten in mehreren Gewerken durchgeführt werden soll. Denn neben der baurechtlichen Konformität müssen die Produkte technisch kompatibel sein.

Es ist naheliegend, dass sich die Modularität von haustechnischen Baugruppen hin zu größeren Einheiten verschieben wird. Ein Beispiel hierfür ist die Projektierung von Klimazentralgeräten². Üblicherweise werden diese vom Haustechnikplaner als voll funktionsfähige und baurechtlich konforme Großeinheit in die Planung des einzelnen Projektes übernommen. Dies bietet im Wesentlichen folgende zwei Vorteile für den Planer: Erstens wird ihm ein Großteil der Interoperabilitätsplanung zwischen den Einzelprodukten abgenommen und zweitens geht ein wesentlicher Teil der gewährleistenden Haftung auf den Hersteller der Gesamtanlage über. In diesem Beispiel handelt es sich jedoch ausschließlich um haustechnikeigene Produkte. Eine gewerkeübergreifende Modularisierung würde die Integration haustechnischer Funktionalitäten in standardisierten Produkten der Baukonstruktion ermöglichen, mit allen technischen und baurechtlichen Abstimmungen. Es soll hierbei ein Teil der planerischen Leistung und Haftung auf den Hersteller des integralen Produktes übergehen. Diesem Paradigma folgt die in dieser Arbeit beschriebene Entwicklung thermisch aktivierter Massivholzelemente.

Paradigmenwechsel in der Haustechnikplanung

Schlitze, Durchbrüche und Installationsdetails müssen im Holzbau-Planungsprozess bereits frühzeitig definiert sein, sodass diese bei der Ausführungs- und Werkplanung sowie der darauffolgenden Produktion in die vorgefertigten Elemente gefräst werden können. Besonders relevant wird eine frühe Integration der technischen Installationen auch und insbesondere, wenn das spätere Bauwerk durch sichtbare Holzoberflächen geprägt sein soll. Dies wird regelmäßig bei Projekten gewünscht, deren primäres Tragwerk aus Brettsperrholzelementen besteht und bei denen eine brandschutztechnische Kapselung der Massivholzbauteile entbehrlich ist. Holzoberflächen in Sichtqualität erlauben keine ästhetischen Korrekturen von Schlitzarbeiten und Durchbrüchen auf der Baustelle. Nach Abschluss der Produktion im Werk gibt es bei dieser Bauweise nur sehr begrenzte Möglichkeiten, Leitungen, Rohre und Kanäle noch auf der Baustelle in die Wand- oder Deckenelemente zu integrieren. Folglich sollte darüber nachgedacht werden, ob standardisierte Bauprodukte wie Brettsperrholzflächenelemente in gewissen Bereichen grundsätzlich über interne Installationsräume für die technische Gebäudeausrüstung verfügen sollten. Dies könnte die frühe Planung und den Einbau der TGA vereinfachen und mit Blick auf den Gebäudelebenszyklus bei späteren Umbaumaßnahmen die Nachrüstung technischer Installationen ermöglichen.

² Als Klimazentralgerät oder auch Zentrale Raumluftechnische Anlage (RLT-Anlage) ist in diesem Zusammenhang das gebäudezentrale Großaggregat gemeint, durch das die gesamte Gebäudezuluft gefiltert, erwärmt, abgekühlt sowie be- und entfeuchtet wird.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich Überlegungen zu weiteren Funktionalisierungen, die durch standardisierte interne Kanäle in Brettsperrholzelementen ermöglicht werden. Am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion wurden diese Überlegungen aufgegriffen und in mehrere Forschungsprojekte überführt (Gräfe et al. 2018). Neben der hier diskutierten raumklimatisierenden Funktion wurde parallel der Einbau von Spanngliedern für die statische Ertüchtigung bei schlanken, hohen Brettsperrholzgebäuden untersucht.

1.2 Raumklima von Massivholzgebäuden

Nachhaltige Raumklimatisierung

Schon 2008 begründeten Kaufmann und Hausladen in einer Studie zur Energie- und Raumklimaoptimierung von Holzbauten im Büro- und Verwaltungsbau (Adnot et al.) die Verlagerung ihres Forschungsschwerpunktes vom winterlichen auf den sommerlichen Wärmeschutz u. a. mit dem stetig zunehmenden Kühlenergiebedarf der Gebäude. Nach einer Studie der EU-Kommission für Energie soll der Nutzenergiebedarf für Kühlsysteme der EU-15-Länder bis 2020 auf mehr als das Vierfache ansteigen im Vergleich zu 1990. Während Transmissionswärmeverluste bei Holzgebäuden mit hochwärmegeprägten Außenwänden bereits heute ein baupraktisch sinnvolles Minimum erreicht haben, gilt es nun, die Wärmeeinträge durch Solarstrahlung und innere thermische Lasten der technischen Ausstattung zu reduzieren. Bei einigen der Holzgebäude, die im Rahmen des Projektes untersucht wurden, sind aufgrund fehlender äußerer Sonnenschutzsysteme oder deren Fehlbedienung durch den Nutzer deutliche Defizite in der sommerlichen Behaglichkeit festgestellt worden. Diese konnten im Nachhinein meist nur durch energieaufwändige, dezentrale Kühlsysteme abgestellt oder abgeschwächt werden (Kaufmann et al. 2008). Im Sinne einer nachhaltigen Gebäudeentwicklung sollte bereits der Entwurf des Architekten auf passive Energieeffizienz optimiert sein und eine aktive Klimatisierung teilweise oder vollständig entbehrlich machen. Dies kann durch passive Maßnahmen erfolgen, wie durch einen angemessenen Dämmstandard, durch einen effektiven Sonnenschutz, durch eine in Art und Ausrichtung auf das Projekt optimierte Verglasung, durch reduzierte interne Lasten oder durch ein auf das Gebäude abgestimmtes Lüftungskonzept. So kann in vielen Objekten auf eine aktive Raumklimatisierung verzichtet werden. Sofern trotz eines energetisch optimierten Gebäudeentwurfs ein ganzjährig behagliches Raumklima nicht gewährleistet werden kann, muss die verbleibende Heiz- und Kühllast mit energieeffizienten haustechnischen Maßnahmen gedeckt werden. Die eingesetzte Gebäudetechnik sollte integraler Bestandteil des Gebäudeentwurfs werden und zum einen eine maximale Energieeffizienz aufweisen und zum anderen in der Lage sein, den Energiebedarf zu großen Teilen aus erneuerbaren Ressourcen zu speisen.

Hausladen bezeichnete diese Strategie als den ‚**Energie-Dreisprung**‘ (Hausladen 2010).

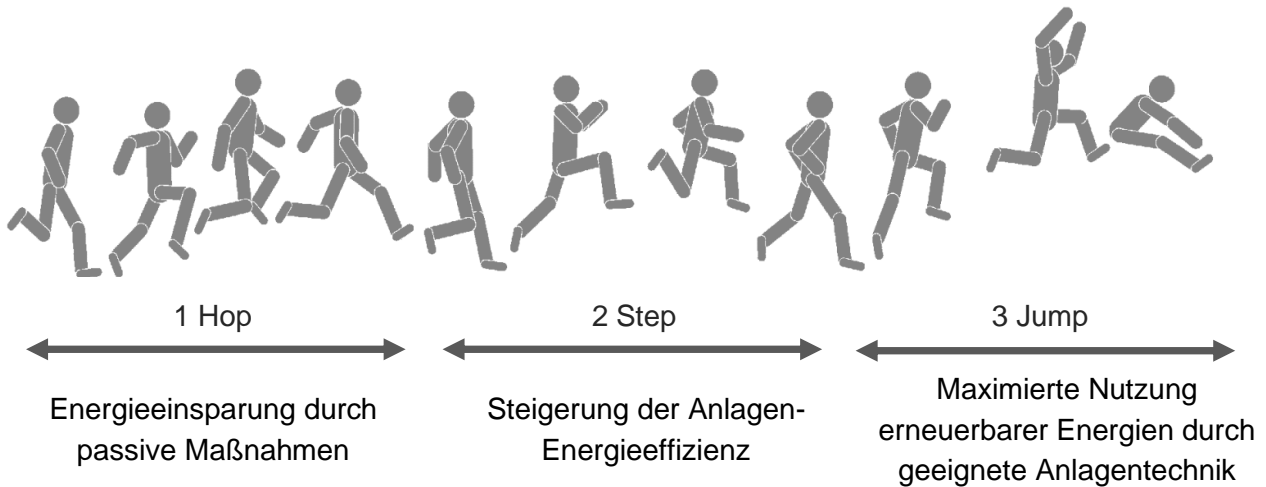


Abbildung 1.1: Der Energie-Dreisprung nach (Hausladen 2010)

Eine Raumklimatisierung in Holzgebäuden sollte ebenso nach dieser Strategie konzipiert werden. Bei der Vorstellung der thermisch aktivierten Massivholzelemente wird detailliert auf die Umsetzung des zweiten und dritten Schrittes eingegangen, während der erste Schritt im Rahmen dieser Arbeit als gegeben angenommen wird.

Raumklima von Massivholzgebäuden

In seiner Dissertation von 2012 an der University of Canterbury untersucht Perez, N. den Einfluss der thermischen Speichermasse auf den Energiebedarf zur Raumklimatisierung in mehrgeschossigen Holz-, Stahl-, und Betongebäuden. Während sich die Bedarfe an Nutzenergie zur Kühlung und für die Beheizung der Gebäude mit bestmöglich gedämmten Fassaden bei den drei Bauweisen nur geringfügig unterschieden, weist er in seiner Arbeit auf große Abweichungen beim sommerlichen Verhalten hin. Explizit benennt er große Tagesschwankungen der Raumoberflächentemperaturen im Holzgebäude. Insbesondere bei jenen Holzbauteilen ließen sich hohe Oberflächentemperaturen nachweisen, welche der direkten eindringenden Solarstrahlung ausgesetzt waren (Perez Fernandez 2012). Infolge der solaren Einstrahlung auf diese Flächen erhöht sich deren Oberflächentemperatur stark und führt häufig zu unbehaglich hohen und unsymmetrischen Strahlungstemperaturen im Raum. Die in der Studie untersuchten Holzkonstruktionen waren in Rahmenbauweise ausgeführt, bei der die raumumschließenden Oberflächen nur im Bereich der tragenden, stabförmigen Elemente massiv waren. Die Ausfachungen bestanden aus dünnwandigen, leichten Plattenbekleidungen mit geringer speicherwirksamer Masse. Aus diesem Grund wird die Gültigkeit dieser Ergebnisse für massive Konstruktionen wie bei raumumschließend sichtbarem Brettsperrholz in Frage gestellt und in einer eigenen Untersuchung aufgegriffen. Am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion wurde hierfür eine auf Feldversuchen basierende und simulationsgestützte Untersuchung zum Einfluss der Wärmekapazität massiver raumumschließender Oberflächen auf den Heizwärmebedarf und auf den sommerlichen Wärmeschutz durchgeführt (Kornadt et al. 2018), (Ertl 2017).

Diese Untersuchung ist speziell auf die Brettsperrholzbauweise ausgerichtet und erlaubt eine Einordnung der raumklimatischen Eigenschaften dieser Bauweise in den Kontext von derzeit praxisrelevanten massiven Baustoffen.

In der Studie wird zunächst ein numerisches, thermisch-hygrisches Raummodell in der Simulationssoftware WUFI-Plus® (Künzel 2017) entwickelt und an den Messdaten eines realen Testgebäudes in Massivholzbauweise validiert. Bei diesem Testgebäude handelt es sich um einen ca. $L \times B \times H = 3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ messenden Brettsperrholz-Kubus mit äußerem Wärmedämmverbundsystem und Außenputz sowie mit einer Süd-Ost ausgerichteten Fenstertür. Darüber hinaus werden drei geometrisch äquivalente Baustoff-Varianten mit gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenbauteile und jeweils praxisüblichen Bauteilaufbauten in 1.) Kalksandstein-Bauweise mit äußerem Wärmedämmverbundsystem, 2.) monolithischer Hochlochziegelbauweise, beidseitig verputzt und 3.) monolithischer Porenbetonbauweise, beidseitig verputzt, numerisch modelliert und bei konstanter Mindestlüftung ausgewertet. Die Wandaufbauten sind so gewählt, dass sie zum einen praxisüblichen Aufbauten entsprechen und zum anderen die Vergleichbarkeit beim Wärmeschutz zwischen den Bauweisen sicherstellen. Dafür wurden die Schichtstärken der Dämmstoffe, bzw. der monolithischen Baustoffe so variiert, dass sich, wie oben erwähnt, bei allen Bauweisen derselbe Wärmedurchgangskoeffizient ergibt. Die Simulationen zeigen lediglich geringe Abweichungen im Heizwärmebedarf zwischen den, nach den aktuellen Anforderungen der Energieeinsparverordnung (Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz 2015), konstruierten Aufbauten. Auch im sommerlichen Verhalten wurde von keiner der Bauweisen annähernd der nach DIN 4108-2: 2013-02 zulässige Anforderungswert der sommerlichen Überhitzung erreicht. Leicht vorteilhaft zeigte sich die Kalksandsteinbauweise, da diese die höchste speicherwirksame Masse auf der Innenseite aufweist. Die vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit des Kalksandsteins begünstigt zudem den Wärmestrom in den raumseitigen Bauteilschichten und damit die speicherwirksame Materialschichtstärke bei der gegebenen Speicherperiodendauer von üblicherweise 24 h.

Darüber hinaus wurde im Rahmen einer Parameterstudie der Fokus auf den Einfluss der volumenbezogenen Wärmespeicherfähigkeit gelegt (Ertl 2017). Hierfür wurden die dies beeinflussenden Parameter 1.) die Rohdichte ρ und 2.) die spezifische Wärmekapazität c variiert. Die Wärmeleitfähigkeit wurde auf $\lambda = 0,1 \text{ W/mK}$ und die Schichtstärke der homogenen Außenbauteile auf $d = 0,4 \text{ m}$ arretiert, um eine konstanten Gesamtwärmedurchgangskoeffizienten zu erhalten. Für eine Verstärkung des Effekts auf den sommerlichen Wärmeschutz wurde die Bezugstemperatur der operativen Raumtemperatur auf $T_{b,op} = 23 \text{ °C}$ gesenkt. In Abbildung 1.2 sind die Linien gleicher spezifischer Wärmekapazität der raumumschließenden Bauteile über deren Rohdichte dargestellt. Die resultierenden Übertemperaturgradstunden können auf der Ordinate in Kelvinstunden pro Jahr abgelesen werden. So soll ein baustoffunabhängiger Eindruck vom Einfluss der beiden genannten Eigenschaften gewährt werden. Zur besseren Orientierung des Wertebereichs sind die vier Baustoffe Porenbeton, Ziegel, Brettsperrholz und Kalksandstein ihren Rohdichte- und Wärmekapazitätswerten zugeordnet. Eine ausführliche Dokumentation dieser Untersuchung kann (ebd.) entnommen werden.

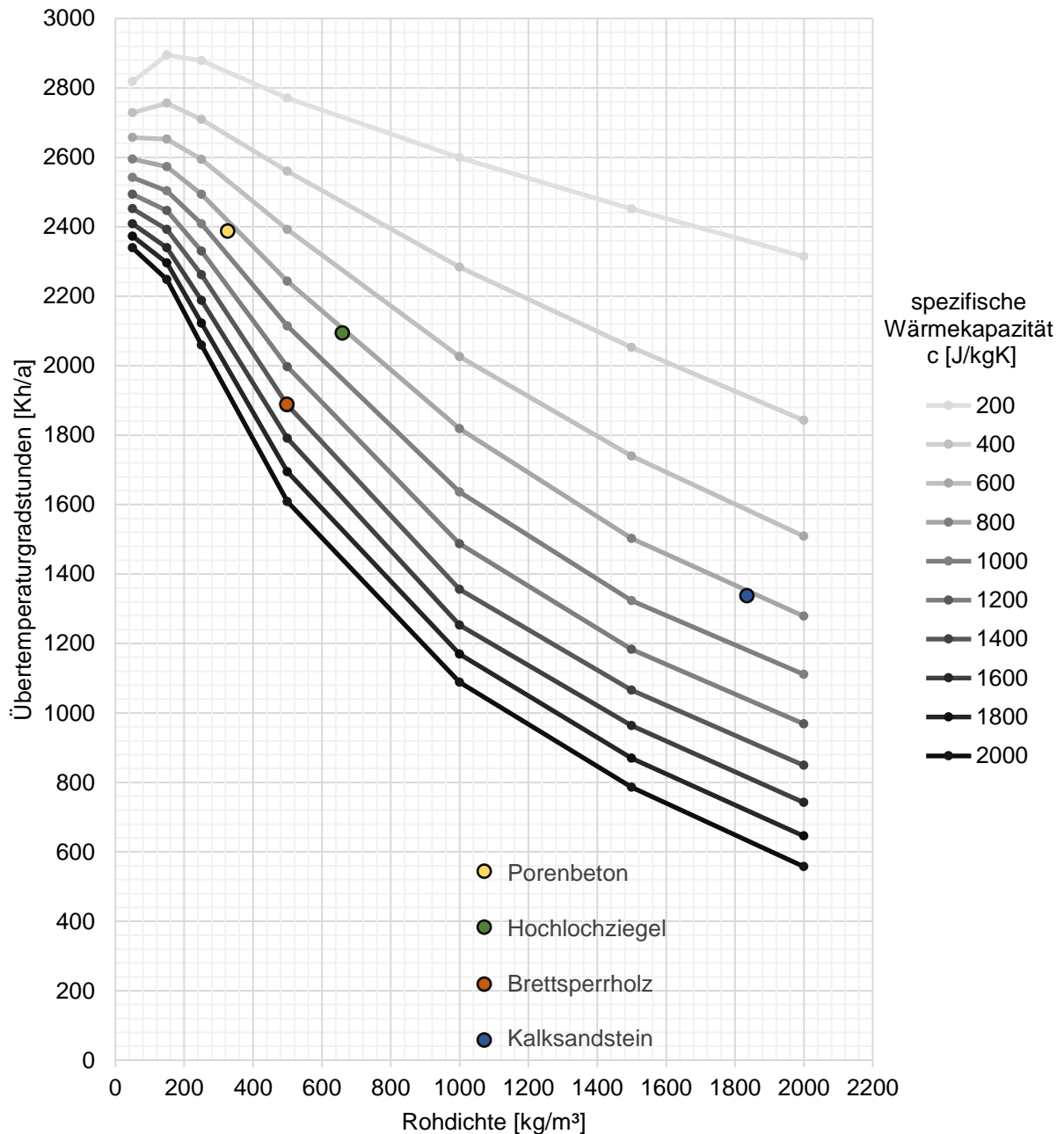


Abbildung 1.2: Auswirkung der Rohdichte und der spezifischen Wärmekapazität der raumumschließenden Baustoffe auf das sommerliche Überheizungsverhalten anhand einer hygrothermischen Raumklimasimulation von Klimatestgebäuden; in Anlehnung an (Ertl 2017).

Daraus wird deutlich, dass die Rohdichte und die Wärmekapazität der raumumschließenden Bauteile gleichermaßen einen hohen Einfluss auf die Übertemperaturgradstunden, also das Maß der sommerlichen Überheizung, haben. Die Ergebnisse zeigen auch, dass in vergleichbaren Einsatzfällen moderne, massive Holzkonstruktionen, zu denen das Brettsperrholz gehört, bezüglich ihres sommerlichen raumklimatischen Verhaltens im Mittelfeld praxisüblicher Baustoffe einzuordnen sind.

1.3 Exkurs zur nachhaltigen adaptiven Energieversorgung von Gebäuden

Vor dem Hintergrund stark zunehmender Einspeisung von fluktuierenden erneuerbaren Energien kommt es vermehrt zu starken Angebotsüberschüssen und Versorgungsengpässen im Stromnetz. Ein Ausgleich der Schwankungen mit Hilfe von Batterien und sonstigen elektrischen Speichern ist sehr kosten- und ressourcenintensiv. Daher wird künftig einer weiteren Prämisse in der Haustechnikplanung, dem Lastmanagement, mehr Bedeutung zukommen. Die Sonne und der Wind lassen sich nicht steuern, aber immer besser prognostizieren. Künftig könnten haustechnische Anlagen durch die Nutzung thermischer Speichermassen stets dann eingeschaltet werden, wenn der Strom im Netz reichlich vorhanden und günstig ist. Durch die Nutzung der in der Anlagentechnik und der in der Gebäudemasse gespeicherten Wärme oder Kälte³ kann der Energiebedarf genau dann reduziert werden, wenn der Strom im Netz rar und teuer ist. Die angebotsorientierte Steuerung des energetischen Lastverhaltens eines Gebäudes und seiner technischen Systeme lässt sich unter dem Begriff ‚Netzreaktive Gebäude‘ beschreiben (Schmidt 2016).

Es gibt seit einigen Jahren Ansätze zur erzeugungsorientierten Verbrauchssteuerung, wie beispielsweise die bei der Photovoltaikanlagen-Förderung angebotenen Eigenverbrauchstarife, bei denen der Betreiber höher vergütet wird, wenn er mindestens einen bestimmten Teil der solar erzeugten Energie unmittelbar und direkt vor Ort selbst verbraucht. Trotzdem sind die Potenziale im Feld des thermischen Gebäudelastrmanagements weitgehend unerschlossen⁴. Die EU-Kommission hat diesbezüglich in der EU Richtlinie 2018/844 den Begriff des ‚Intelligenzindikators‘ eingeführt, der die Einsatzbereitschaft von Gebäuden in intelligenten Stromnetzen bewertet. Darunter haben sich zwei Arten von Flexibilitätsindikatoren herauskristallisiert. Diese gliedern sich einerseits in ‚Potenzial-Indikatoren‘, die ausschließlich die bauphysikalischen und technologischen Eigenschaften des Gebäudes bewerten. Sie beschreiben die Zeit der Lastverschiebung und die Energiemenge, die verlagert werden kann. Die ‚Leistungsindikatoren‘ hingegen sind dem Ziel einer spezifischen Lastmanagement-Anwendung untergeordnet. Beispielsweise ergeben verschiedene Lastmanagementstrategien zur Energiekostensenkung, CO₂-Emissionsreduzierung oder Lastspitzenreduktion unterschiedliche Speicherpotenziale (Jensen et al. 2017).

³ Der Ausdruck „Kälte“ ist physikalisch gesehen nicht korrekt, da „Kälte“ lediglich Wärme auf einem niedrigeren Temperaturniveau ist.

⁴ Abzugrenzen von der Thematik der Netzreaktiven Gebäude sind die bis in die 1980er Jahre in Deutschland verbauten Nachtspeicherheizungen. Diese wurden nicht eingesetzt, um einer fluktuierenden Erzeugung zu folgen sondern, um eine ganztägig gleichbleibend hohe elektrische Last in den Netzen und somit eine bessere Auslastung der großen konventionellen Grundlastkraftwerke zu erreichen (Fischer (1992).

1.4 Ziele der Arbeit und Abgrenzung des Untersuchungsumfangs

Die Motivation des in der vorliegenden Dissertation beschriebenen Promotionsvorhabens ist die Durchführung einer Grundlagenentwicklung zu thermisch aktivierten Massivholzelementen. Darin soll sowohl die Herstellbarkeit des zu entwickelnden Systems mit aktuell zur Verfügung stehenden Produktionsanlagen als auch die Leistungsfähigkeit zur Raumklimabeeinflussung theoretisch und experimentell erforscht werden. Für den Einsatz des Systems in der Praxis sollen dem Planer Auslegungswerkzeuge bereitgestellt werden, die sowohl eine konventionelle, stationäre Diagramm auslegung als auch eine dynamische Auslegung mittels thermischer Gebäudesimulation erlauben. Um dem Leser dieser Arbeit eine methodische Einordnung und Abgrenzung des erarbeiteten Beitrags zu veranschaulichen, ist in der Abbildung 1.3 der sequenzielle Ablauf der Systementwicklung dargestellt, beginnend mit der Grundlagenentwicklung über die herstellerepezifische Produktentwicklung, hin zur Bauplanung, der Produktion, der Montage und dem Betrieb bis zum Rückbau am Lebenszyklusende.

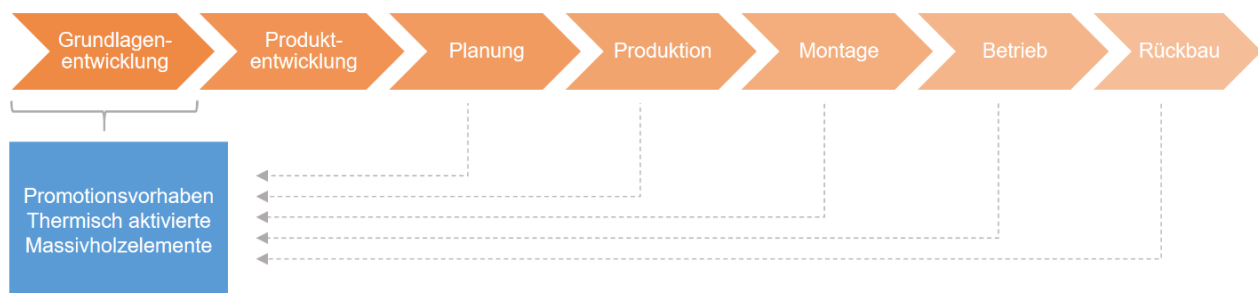


Abbildung 1.3: Einordnung und Abgrenzung des Promotionsvorhabens

In der Grundlagenentwicklung, die den Gegenstand des Promotionsprojektes darstellt, werden Aspekte der Planung, der Produktion der Montage, des Betriebs und des Rückbaus betrachtet. Dies soll durch die gestrichelten Pfeilbeziehungen in der Abbildung verdeutlicht werden. Ein Ziel ist, dass auf der Grundlage dieser Arbeit eine herstellerepezifische Produktentwicklung erfolgen kann. Die durchgeführte Grundlagenentwicklung selbst hat den Anspruch, herstellerunabhängig den Werkstoff Holz im Allgemeinen und das Produkt Brettsperrholz im Speziellen für den Einsatz als thermisch aktiviertes Massivholzelement zu untersuchen.

1.5 Aufbau der Arbeit und methodisches Vorgehen

KAPITEL 1 soll den Leser der Arbeit auf die gedankliche Ausgangssituation bringen, aus der die Idee einer thermischen Aktivierung von Brettsperrholzelementen entstanden ist. Dabei wird zum einen auf die raumklimatischen Eigenschaften von Holz- und insbesondere Massivholzgebäuden eingegangen. Zum anderen sollen die Prämissen der aktiven Raumklimaregulierung vor dem Hintergrund der zukünftigen Versorgungsnetzstruktur beschrieben werden.

Das KAPITEL 2, die Diskussion zum Stand der Wissenschaft und Technik, nimmt in dieser Arbeit einen großen Raum ein. Dieses dient dem Zweck, dem interessierten Fachexperten die Grundlagen des eigenen, aber insbesondere des jeweils anderen Fachgebietes zu erläutern.

Zur Wahrung der didaktischen Qualität wurde tendenziell früh, bereits in den Grundlagenerläuterungen, Bezug auf die spezifische Aufgabenstellung dieser Arbeit genommen. Beispielhaft hierfür ist die Auswahl der einschlägigen Ähnlichkeitsmodelle bei der Beschreibung der konvektiven Prozesse in und an den thermisch aktivierten Massivholzelementen.

Ab KAPITEL 3 beginnt die Konzeptvorstellung und die Dokumentation der Entwicklung von thermisch aktivierten Massivholzelementen. Zunächst wird die konzeptuelle Verwendung von Brettsperrholzelementen als Raumheizung und -kühlung vorgestellt und eine Eingrenzung der systemischen Ausführungsarten getroffen. Es werden Entwicklungsparameter des Systems identifiziert und separat bewertet. Als Ergebnis dieser Vorüberlegungen wird festgelegt, wie die weitere Untersuchung sowie die Umsetzung von zwei Prototypen thermisch aktivierter Brettsperrholzwandelemente realisiert werden kann.

KAPITEL 4 dokumentiert die experimentelle Untersuchung. Dazu gehören das Produktionskonzept, die Planung sowie die Herstellung der beiden Prototypen. Daran anschließend findet eine Beurteilung ex post des Herstellungsprozesses und die Benennung von Verbesserungsvorschlägen für die Produktion weiterer Probekörper statt. An die Produktion der Prototypen schließt die Beschreibung der Laborversuche an. Dort werden neben der Konfiguration der Versuche auch die Messergebnisse vorgestellt. Dazu gehören die erreichte thermische Leistung des Systems sowie die limitierenden Faktoren, wie beispielsweise die sich einstellenden Holzfeuchtwerte. Separate Messungen der aerodynamischen Verhältnisse im Systemluftkreislauf und darauf aufbauende Verbesserungsvorschläge sollen helfen, die Druckverluste im Element zu reduzieren und die Energieeffizienz des Systems zu verbessern.

In KAPITEL 5 werden Berechnungsmodelle zur Beschreibbarmachung der thermischen Leistung des Systems entwickelt und an den Messreihen validiert. Diese Modelle sollen dem Verwender des Systems als Auslegungswerkzeug für die Projektierung der thermisch aktivierten Massivholzelemente in konkreten Anwendungsszenarien dienen. Entsprechend den aktuellen praktischen Anforderungen der Planung werden zwei Modelle zur Systemauslegung bereitgestellt: Erstens eine diagrammbasierte, stationäre Schnellauslegung und zweitens die instationäre Auslegung mittels thermischer Gebäudesimulation.

In KAPITEL 6 wird ausführlich Stellung genommen zur erreichbaren Leistung von luftführenden, thermisch aktivierten Massivholzelementen. Die Diskussion der Leistungsfähigkeit findet auf zwei unterschiedlichen Ebenen statt. Auf Bauteilebene wird die flächenspezifische, thermische Leistung des vorgestellten Systems im Vergleich zu ähnlichen, praxisüblichen Flächenheiz- und Kühlsystemen bewertet. Auf Raumebene wird das System anhand der validierten numerischen Modelle in repräsentativen Einsatzszenarien getestet. Daraus wird eine Aussage darüber getroffen, ob das System in der Lage ist, ganzjährig das gewünschte Raumklima und die thermische Behaglichkeit zu gewährleisten.

KAPITEL 7 liefert eine zusammenfassende Bewertung des Entwicklungsstandes von luftführenden, thermisch aktivierten Massivholzelementen, eine Stellungnahme der Leistungsfähigkeit sowie eine Erläuterung des auf dieser Arbeit aufbauenden weiteren Forschungsbedarfs.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Der Werkstoff Holz – eine Betrachtung auf Materialebene

2.1.1 Erklärungsansatz

Die folgende Beschreibung des makro- und mikroskopischen Aufbaus des Holzes soll ein Grundverständnis für die Eigenschaften des in dieser Arbeit untersuchten Materials bieten. Entsprechend des Themas zielen die Erläuterungen primär auf das Verständnis der hygrischen und thermischen Eigenschaften des Holzes.

2.1.2 Mikroskopischer Aufbau

Jede Zelle eines Baumes besitzt eine massive Zellwand, welche die eigentliche Holzsubstanz darstellt. Die mechanischen und weiteren Eigenschaften des Materials Holz werden maßgeblich durch die Zusammensetzung und Verteilung seiner chemischen Bestandteile bestimmt. Die drei Grundsubstanzen der Zellwände sind, wie in Tabelle 2-1 aufgeführt, Cellulose, Hemicellulose und Lignin (Neroth/Vollenschaar 2011).

Tabelle 2-1: Hauptbestandteile von Holz (Neroth/Vollenschaar 2011)

Hauptbestandteile	Anteil	
	Nadelholz	Laubholz
Cellulose	42 - 49 %	42 - 51 %
Hemicellulose	24 - 30 %	27 - 40 %
Lignin	25 - 30 %	18 - 24 %

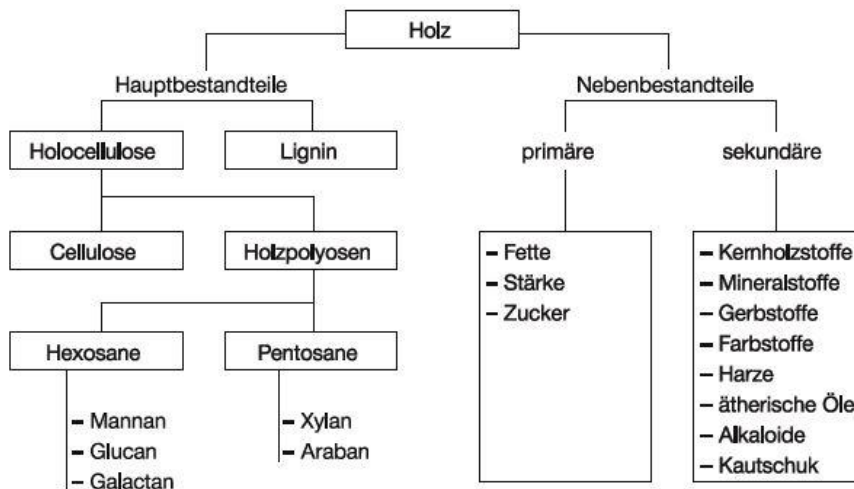


Abbildung 2.1: chemische Zusammensetzung des Holzes (Neroth/Vollenschaar 2011)

Abbildung 2.2 zeigt den Aufbau einer Holzzelle. In der Mittellamelle, sowie in der Primärwand ist hauptsächlich Lignin angereichert, welches der Zellwand Steifigkeit und Druckfestigkeit verleiht. Die Sekundär- und Tertiärwand besteht überwiegend aus Cellulose, die im lebenden Baum, aber auch im späteren Werkstoff den Zugkräften entgegenwirkt (Isopp/Stralz 2012).

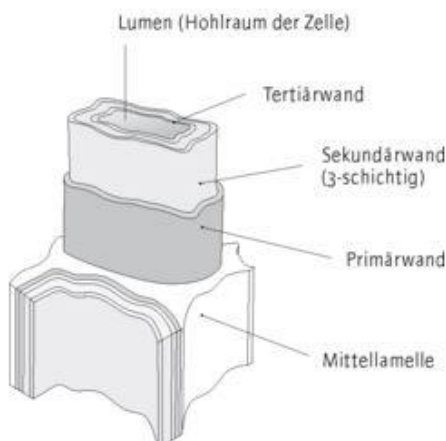
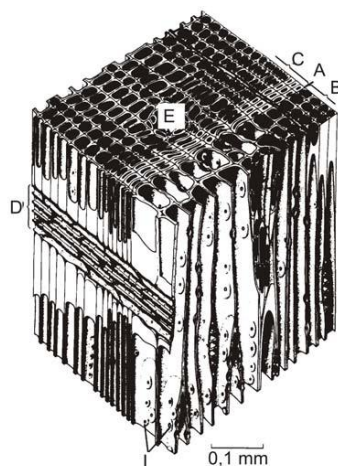


Abbildung 2.2: Aufbau einer Holzzelle (Isopp/Stralz 2012)

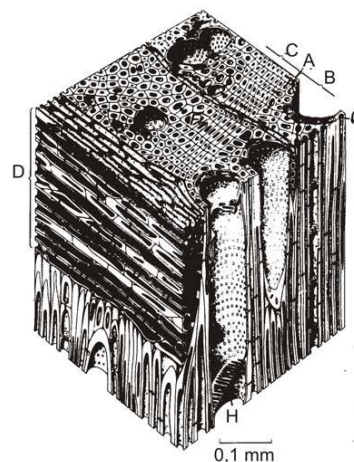
Wie in Tabelle 2-1 ersichtlich, unterscheiden sich Nadel- und Laubhölzer anhand ihrer chemischen Zusammensetzung. Ebenso lassen sich an den Zelltypen beider Hölzer einige Besonderheiten feststellen.

Nadelholz

Nadelgewächse bilden das evolutionär ältere Holz. Sie besitzen ein einfaches, axial ausgerichtetes Grundgewebe aus Tracheiden. Diese sind als Urform der Holzzelle anzusehen und bilden größtenteils, mit bis zu 95 Vol.-%, das Holz der Nadelbäume. Ihre Länge beträgt im Mittel wenige Millimeter, wobei das übliche Verhältnis von Länge zu Durchmesser bei 100 liegt. Diese schlauchförmigen Tracheiden weisen im Frühholz große Hohlräume und dünne Zellwände auf, da sie in der Wachstumsphase die Aufgabe des Flüssigkeitstransports übernehmen. Im Spätholz erfüllen sie mit ihren dicken Zellwänden und kleinen Hohlräumen eine festigende Funktion. Radial verlaufende Tracheiden (Holzstrahltracheiden) sind in das axial verlaufende Gewebe aus Tracheiden eingebettet und übernehmen den Transport zur Versorgung des außenliegenden Kambiums. Der Stoffwechsel zwischen den Zellen, wie der Transport des in den Hohlräumen (Lumen) transportierten Wassers, erfolgt über Verbindungen zwischen den Tracheiden. Diese Verbindungen werden Hoftüpfel genannt. Der Wirkmechanismus der Tüpfel kann anhand eines Rückschlagventils oder einer Herzklappe beschrieben werden. Kommt es zu einer Druckdifferenz im Wasserleitsystem, verschließt oder öffnet sich diese Zellverbindung je nach Druckgefällerrichtung (Kollmann 1955), (Niemz 2011). Eine schematische Darstellung von Nadelholz ist in Abbildung 2.3 gezeigt.



- A) Jahresringgrenze
- B) Frühholz
- C) Spätholz
- D) Markstrahl
- E) Harzgang
- I) Tüpfel



- A) Jahresringgrenze
- B) Frühholz
- C) Spätholz
- D) Markstrahl
- F) Tracheide
- G) Hartfaser
- H) Gefäß

Abbildung 2.3: Schematische Darstellung von Nadelholz; aus (Wesche 1988)

Abbildung 2.4: Schematische Darstellung von Laubholz; aus (Wesche 1988)

Laubholz

Unter den Laubhölzern hat sich aus der tracheidenähnlichen Urholzzelle eine Vielzahl distinkter Zellarten herausentwickelt (siehe Abbildung 2.4). Der Hauptteil der Wasserleitung erfolgt im Laubholz über Gefäße, auch Tracheen oder Poren genannt. Diese erreichen eine Länge von wenigen Zentimetern bis zu einigen Metern. Nach der Anordnung der Poren über den Jahresringen kann bei Laubhölzern zwischen ringporigen, halbringporigen und zerstreutporigen Hölzern unterschieden werden. Der Stoffwechsel zwischen den Gefäßen erfolgt wie beim Nadelholz über die Tüpfel (Kollmann 1951).

Die Festigungsfunktionen übernehmen im Laubholz größtenteils Librifasern, auch Holz- oder Hartfasern genannt. Durch ihre dicken Zellwände und die verhältnismäßig kleinen Zellhohlräume machen sie die Hauptmasse des Holzkörpers aus. Festigkeits- und Wasserleitungsaufgaben übernehmen, ähnlich wie beim Nadelholz, die Fasertracheiden. In Tabelle 2-2 ist die Aufgabenverteilung der verschiedenen Zelltypen in Laub- und Nadelhölzern noch einmal als Übersicht dargestellt (ebd.).

Tabelle 2-2: Struktur-Funktionsbeziehungen; aus: (Kollmann 1951)

	Nadelholz	Laubholz
Festigung	Spätholztracheiden	Librifasern, Fasertracheiden
Wasserleitung	Frühholztracheiden	Gefäße, Fasertracheiden
Speicherung	Parenchymzellen	Parenchymzellen

2.1.3 Makroskopischer Aufbau

Holz, das multizelluläre Geflecht, besteht, wie zuvor erwähnt, hauptsächlich aus Cellulose und Lignin. Es enthält Harze, Wachse, Fette, Öle, Stärke, Zucker, diverse Mineral-, Gerb- und Farbstoffe sowie Alkaloide. Es ist das Lignin, welches aus den gewachsenen, zunächst stark elastischen Pflanzenzellen den Baustoff Holz macht. Dessen mechanische Eigenschaften geben der Pflanze ihre Stabilität und machen sie seit Jahrtausenden zu einem begehrten Baustoff. Im Leben der Pflanze erfüllt es die folgenden drei Hauptaufgaben:

- die Wasserleitung,
- die Speicherung von Reservestoffen und
- die Festigung.

Durch die Streckung der Zellen entlang der Längsrichtung der Pflanze sind die mechanischen, thermischen und hygri-schen Eigenschaften des Materials Holz stark richtungsabhängig. Diese Richtungsabhängigkeit eines Materials wird Orthotropie oder auch orthogonale Anisotropie genannt. Die Richtungsbezeichnungen sind Raumachsen eines kartesischen Koordinatensystems und basieren auf der Anatomie des Baumquerschnitts. Die Achsrichtung entlang der Holzfaser, respektive entlang der Pflanzenachse wird als ‚longitudinal‘ oder ‚axial‘ bezeichnet. Die beiden übrigen Achsen des Koordinatensystems sind quer zur Faser ausgerichtet. Unterschieden werden diese nach der Lage der Jahresringe. Parallel zu den Jahresringen verläuft die ‚tangentiale‘, orthogonal verläuft die radiale Achsrichtung.

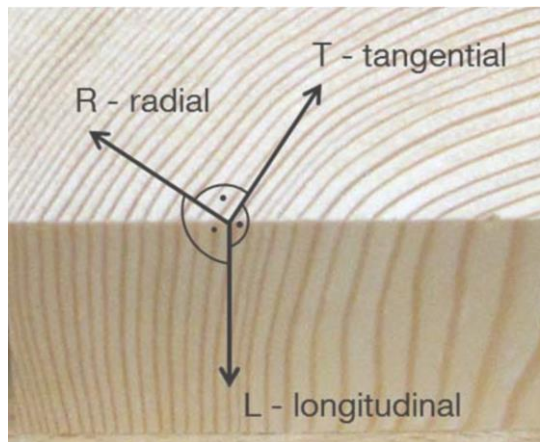


Abbildung 2.5: Bezeichnung der drei Hauptrichtungen des Holzes; aus: (Schaffrath 2015)

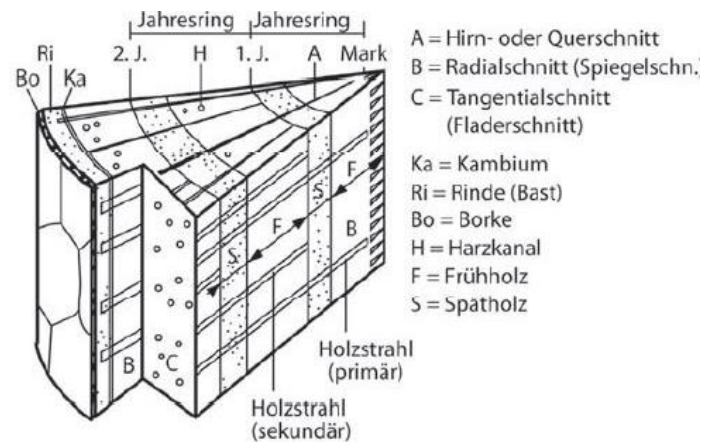


Abbildung 2.6: Anatomischer Strukturaufbau eines Stammes; aus: (Neroth/Vollenschaar 2011)

Analog zu den drei Achsrichtungen des Holzes sind beim Umgang mit diesem Werkstoff die folgenden richtungsspezifischen Bezeichnungen der Hauptschnittrichtungen üblich. So wird der Querschnitt durch den Stamm eines Baumes als Hirnschnitt, der Radialschnitt als Spiegelschnitt und der Tangentialschnitt als Fladerschnitt bezeichnet (Neroth/Vollenschaar 2011).

Im rechtwinklig zur Stammachse verlaufenden Hirn- oder Querschnitt, vgl. Abbildung 2.5, lassen sich mit bloßem Auge folgende Strukturen erkennen:

Das Mark im Zentrum des Stammes übernimmt während des Wachstums die Aufgabe der Wasserleitung und Speicherung. Es stirbt, mit Ausnahme weniger Arten wie Birke, Buche oder Erle, verhältnismäßig frühzeitig ab.

Die Holzstrahlen dienen der Speicherung und dem radialen Stofftransport. Als primäre Holzstrahlen verbinden sie das Markgewebe mit der Rinde. Reichen sie nicht vom Mark bis in die Rinde werden sie sekundäre Holzstrahlen genannt.

Das sekundäre Dickenwachstum des Baumes wird durch das Kambium gesteuert, indem Kambiumzellen nach außen und innen neue Zellen abgeben. Es befindet sich zwischen Rinde und eigentlichem Holz (Xylem).

Die Rinde besteht aus Bast und Borke. Der Bast dient dem Baum als Transport- und Speicherewebe, während die Borke eine äußere Schutzschicht bildet, die den Baum vor Umwelteinflüssen, wie Frost, Wärme oder Pilzen schützt.

Durch die zyklische Tätigkeit des Kambiums, ein durch Ruhephasen unterbrochenes Wachstum, entstehen Zuwachszonen. In Klimaregionen mit winterlicher Vegetationsruhe entsprechen diese Zonen dem jährlichen ring-förmigen Zuwachs eines Baumes. Infolgedessen werden sie Jahresringe genannt. Zählt man die Jahresringe, lässt sich das Alter des Baumes bestimmen. Wahrnehmbar werden diese, da der Baum zu Beginn und am Ende der Vegetationsperiode Zellen unterschiedlicher Art, Größe, Anzahl und Verteilung anlegt. Je nach jahreszeitlichem Entstehen kann zwischen Früh- und Spätholz unterschieden werden.

Das Frühholz erfüllt hauptsächlich den Zweck der Leitung von Wasser und Nährstoffen. Die Zellen sind deshalb dünnwandig und weitlumig. Gebildet wird dieses zu Beginn der Vegetationsperiode im April oder Mai. Das Spätholz ist dickwandig und englumig und dient der Festigung. Entsprechend den Dichteunterschieden stellen sich Farbunterschiede ein. Das Frühholz ist aufgrund der dünnwandigen Zellen heller als das Spätholz.

Bei vielen Bäumen hebt sich der innere Teil des Stammes, der Kern, beträchtlich durch seine dunklere Farbe von der äußeren Holzschicht des Stammes, dem Splint, ab. Das Kernholz enthält keine lebenden Zellen mehr und erfüllt keine Wasserleitfunktion, da der Baum für Wasserleitung und Nährstoffbeförderung nur die äußeren Jahresringe, das Splintholz, benötigt. Während der Verkernung bilden sich im Kern Gerb- und Farbstoffe, die das Holz dunkel färben und zum Teil vor Zersetzung schützen (Neroth/Vollenschaar 2011), (Kollmann 1951).

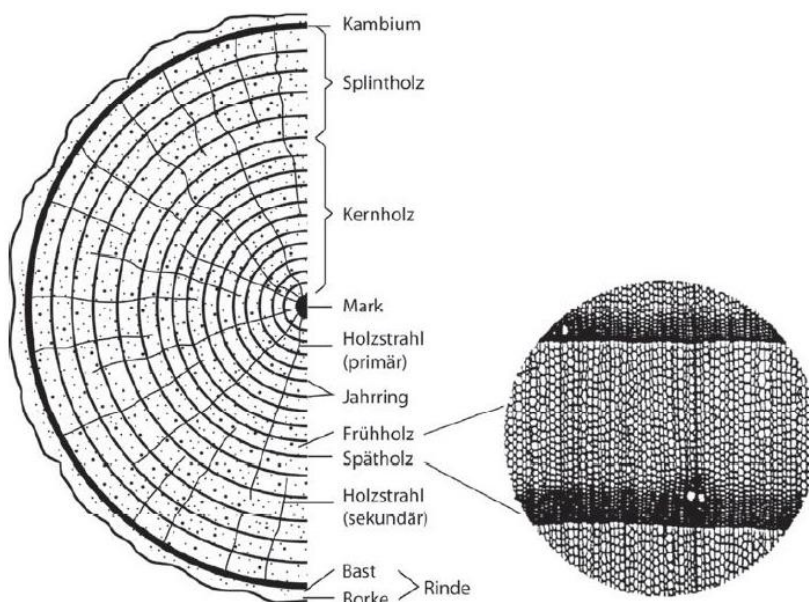


Abbildung 2.7: Querschnitt eines Nadelholzstammes; aus: (Neroth/Vollenschaar 2011)

Gründend auf den Erläuterungen zur Holzanatomie sollen nachfolgend die für diese Arbeit relevanten physikalischen Vorgänge im Holz, und daraus hergeleitet, die Materialeigenschaften des Werkstoffs beschrieben werden.

2.2 Bauen mit Brettsperrholz – eine Betrachtung auf Produktebene

2.2.1 Entwicklung

Brettsperrholz gehört zu den jüngeren Entwicklungen im Bereich der Massivholzprodukte. Im Jahr 1998 wurden in Deutschland und Österreich die ersten bauaufsichtlichen Zulassungen für verschiedene Brettsperrholzprodukte erteilt (Kaufmann/Krötsch/Winter 2017).

Beim Brettsperrholz handelt es sich um ein flächiges, massives Holzprodukt für tragende Anwendungen. Bestehend aus mindestens drei rechtwinklig zueinander verklebten Brettlagen aus Nadel-schnittholz kann es in mehrgeschosshohen Abmessungen produziert werden. Durch die tragenden und raumbildenden Bauteileigenschaften ist Brettsperrholz für die Herstellung von Wand-, Dach- und Deckentafeln verwendbar. Neben der deutschen herstellernerutralen Produktbezeichnung Brettsperrholz, kurz BSP, ist hierzulande die englische Bezeichnung Cross Laminated Timber, kurz CLT oder X-Lam, üblich. In Deutschland wird mit einer nationalen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBT) oder einer europäischen technischen Zulassung; engl.: European Technical Approval ETA) die Verwendbarkeit beziehungsweise Anwendbarkeit des Zulassungsgegenstandes im Sinne der Landesbauordnung nachgewiesen (Mestek/Werther/Winter 2010).



Abbildung 2.8: links: Produkt Brettsperrholz; rechts: Rohbau aus Brettsperrholzwandtafeln; aus: (Mestek/Werther/Winter 2010)

In den Zulassungen sind die Mindestanforderungen an die Produktion, die Anforderungen an das Produkt sowie die Qualitätskontrolle und geforderte Kennzeichnungen definiert. Darüber hinaus sind in den Zulassungen Bestimmungen zu statischen, brandschutztechnischen und bauphysikalischen Bemessungen enthalten. Eine europäische Produktnorm wird unter der Normnummer EN 16351 derzeit vorbereitet.

2.2.2 Herstellungsprozess

In diesem Abschnitt soll die Brettsperrholzproduktion nach dem aktuellen Stand der Technik beschrieben werden. Hiermit soll dem Leser dieser Arbeit das grundlegende Verständnis um die Möglichkeiten und Restriktionen der Brettsperrholz-Produktionsanlagen vermittelt werden. Auf dieser Grundlage wird die konkrete Implementierung der thermischen Aktivierung der Massivholzelemente in Kapitel 4 diskutiert.

Im weitgehend automatisierten Herstellungsprozess durchläuft das Schnittholz nach dem Sägewerk die folgenden sechs Schritte bis zum fertigen Produkt, dem Brettsperrholz:

1. Technische Trocknung der Lamellen auf eine Holzfeuchte von $12 \% \pm 2 \%$.
2. Visuelle oder maschinelle Sortierung nach Festigkeitsklassen. Die Brettlamellen für die äußeren Decklagen werden zusätzlich nach ästhetischen Aspekten sortiert.
3. Festigkeitsmindernde oder das Aussehen beeinträchtigende Bereiche werden falls nötig ausgekappt und die einzelnen Bretter bzw. Brettabschnitte über eine Keilzinkenverbindung zu Lamellen der gewünschten Länge gestoßen. Anschließend erfolgt das Hobeln oder Schleifen der Lamellen auf die gewünschte Dicke und die gewünschte Oberflächenqualität.
4. Mit den vorsortierten und um Fehlstellen bereinigten Brettlamellen erfolgt nun der eigentliche Brettsperrholzherstellungsprozess. Dafür werden die Brettlamellen nebeneinander angeordnet und flächig verklebt. Die nächste Lage der Brettlamellen wird jeweils um 90 Grad gedreht aufgelegt. Die Brettlamellen der äußeren Decklagen werden regelmäßig in einem Vorprozess schmalseitig verklebt. Optional werden auch innenliegende Schichten schmalseitig verklebt.
5. Der mit Kleber benetzte Schichtaufbau härtet anschließend in einem hydraulischen oder einem vakuumbetriebenen Pressbett unter mechanischem Druck aus. Die Wahl des verwendeten Pressbettes richtet sich nach dem gewünschten Format der Brettsperrholzelemente. Während die hochstandardisierten Systemformate in hydraulischen Pressen gefertigt werden, ermöglicht das flexibel bestückbare Vakuumpressbett auch die Herstellung von Sonder- und Großformaten.
6. Der Abbund der fertigen Brettsperrholzelemente sowie deren Oberflächenbehandlung erfolgen in der Regel direkt im Herstellungswerk und werden kundenindividuell ausgeführt.

In *Abbildung 2.9* sind diese sechs Prozessstufen schematisch dargestellt:

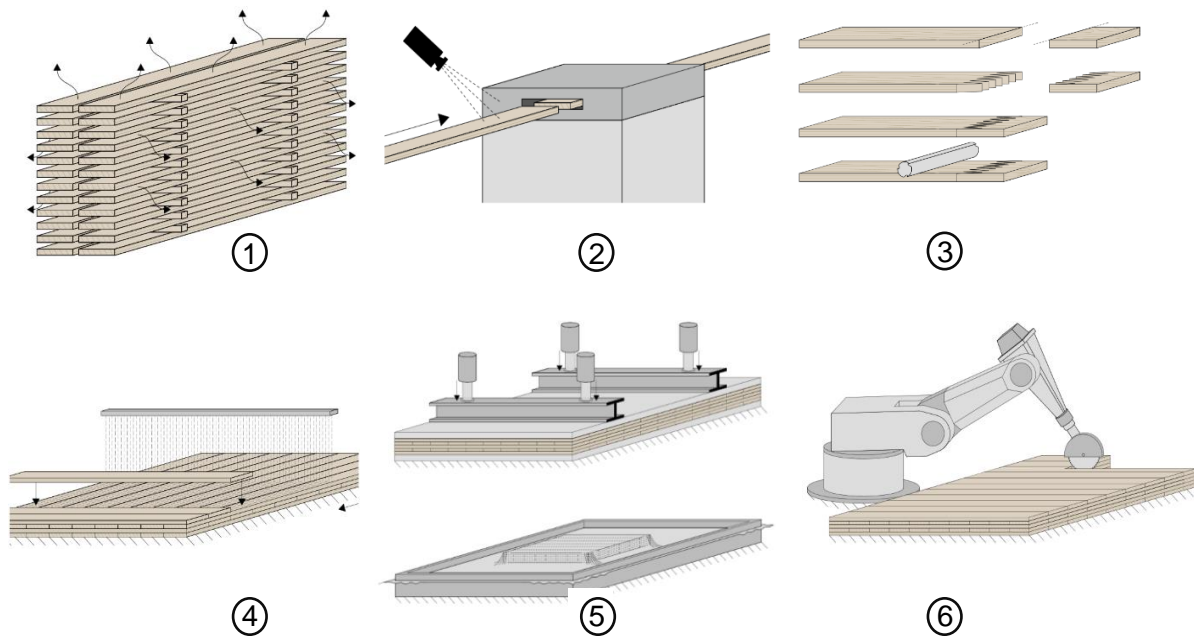


Abbildung 2.9: Herstellungsprozess von Brettsperrholz; in Anlehnung an (Mestek/Werther/Winter 2010)

Übliche Aufbauten des Brettsperrholzes beginnen mit mindestens drei kreuzweise verklebten Lagen aus Brettlamellen. Zur Schwerachse des Elements sind diese in der Regel symmetrisch angeordnet. Dabei sind auch mehrere parallele Lagen in Haupttrichtung möglich, um höhere Normallasten abzutragen. Ferner lassen sich für unterschiedliche funktionale Anforderungen Lagen aus Holzwerkstoffplatten wie z.B. OSB in den Schichtenaufbau integrieren (Mestek/Werther/Winter 2010). Je nach geltender Zulassung lassen sich Brettsperrholzelemente bis zu einer Dicke von 500 mm und standardmäßigen Plattengrößen von bis zu 3,5 m x 22 m herstellen (Binderholz GmbH 2019). Die werkseitige Produktion der fertig abgebundenen Wand-, Dach- und Deckenbauteile ermöglicht unabhängig von der Witterung einen hohen Vorfertigungsgrad. Somit kann die Zeit für die Errichtung der Rohbauten auf ein Minimum verkürzt werden.

2.2.3 Nachhaltigkeit

Anstelle der häufig zitierten stofflich-energetischen Eigenschaften von Massivholzprodukten soll hier unter dem Begriff der Nachhaltigkeit die stoffliche Weiterverwendbarkeit diskutiert werden. Ein wesentlicher Grundgedanke dieses Aspektes ist die Ein-Stoff-Philosophie in der Konstruktion mit Brettsperrholz. In vielen Anwendungsfällen genügen die inhärenten Eigenschaften des Brettsperrholzes den Anforderungen aus Bauphysik und Brandschutz. Einfache Bauteilanschlüsse und das folienfreie Bauen machen die Konstruktion robust gegen Fehler in der Montage sowie in der Installation tangierender Gewerke. Bereits im Planungsprozess werden die Baumaterialien so miteinander kombiniert und anschließend eingebaut, dass diese am Lebenszyklusende sortenrein voneinander getrennt und in vielen Fällen wiederverwendet werden können. Dieser Gedanke soll auch die Entwicklung von thermisch aktivierbaren Massivholzelementen stark beeinflussen.

2.3 Hygrische Eigenschaften und Vorgänge von Brettsperrholz

2.3.1 Einheiten der Holzfeuchte

Im Fachgebiet der Bauphysik gilt Holz als kapillarporöser und hygroskopischer Stoff. Aus dem durchschnittlichen Porenanteil, je nach Rohdichte des Holzes sind das 50 – 60 %, resultiert eine große innere Oberfläche. Wie jedes poröse Material kann das Holz mit Hilfe des Hohlraumgefüges Wasser aus der Luft absorbieren. Zusätzlich kann es flüssiges Wasser oder andere Fluide, wie Klebstoffe oder Holzschutzmittel, durch kapillare Transportprozesse aufnehmen und durch das Material leiten. Daher beinhaltet Holz in Abhängigkeit seiner klimatischen Umgebungsbedingungen immer eine gewisse Menge Wasser in seiner Zellstruktur. Die daraus resultierende Holzfeuchte u ist definiert als das Verhältnis der Masse des im Holz enthaltenen Wassers zu der Trockenmasse des Holzes, der sogenannten Darmmasse, und wird in Massenprozent angegeben (Niemz 1993):

$$u = \frac{m_w}{m_{dtr}} \cdot 100 = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2-1)$$

u	[%]	Holzfeuchte in Massen-%
m_w	[g]	Massen des im Holz enthaltenen Wassers
m_u	[g]	Masse des feuchten Holzes
m_{dtr}	[g]	Masse des darrtrockenen Holzes

Die Bestimmung der Holzfeuchte u ist in DIN EN 13183 geregelt. Teil 1 dieser Norm regelt die Bestimmung des Feuchtegehalts durch das Darrverfahren, Teil 2 die Schätzung des Feuchtegehalts durch das elektrische Widerstands-Messverfahren und Teil 3 die Schätzung der Holzfeuchte u durch das kapazitive Messverfahren. Für das Holzfeuchtemonitoring während der Experimente an den beiden Prototypen wurde das Widerstandsmessverfahren gewählt. Zur Abschätzung der Messungenauigkeit dieses Verfahrens wurden am Ende der Langzeitexperimente Materialproben aus den Prototypen entnommen und dem Darrverfahren unterzogen. Die quantitative Angabe des im Holz enthaltenen Wassers erfolgt in dieser Arbeit stets mittels der Größe der Holzfeuchte u nach der obigen Definition.

Eine weitere verbreitete Angabe der im Holz enthaltenden Wassermenge ist die Angabe des gravimetrischen Wassergehaltes w . Dieser wird bei der Feuchteangabe von festen Biomassebrennstoffen wie Scheitholz nach DIN EN ISO 18134-1 2015-12 verwendet. Betragsmäßig dürfen diese Größen nicht gleichgesetzt werden. Denn der Bezug der Holzfeuchte u ist die darrtrockene Holzmasse, wohingegen sich der Wassergehalt w auf die Masse der feuchten Stoffprobe bezieht.

$$w = \frac{m_w}{m_u} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2-2)$$

w	[%]	Wassergehalt in Massen-%
m_w	[g]	Massen des im Holz enthaltenen Wassers
m_u	[g]	Masse des feuchten Holzes

Zur Umrechnung zwischen Holzfeuchte u und Wassergehalt w dienen die beiden Formeln:

$$w = \frac{u}{100 + u} \cdot 100 \quad \text{\% - Holzfeuchte zu \% - Wassergehalt} \quad (2-3)$$

$$u = \frac{\omega}{100 - \omega} \cdot 100 \quad \text{\% - Wassergehalt zu \% - Holzfeuchte} \quad (2-4)$$

w	[%]	Wassergehalt in Massen-%
u	[%]	Holzfeuchte in Massen-%
m_u	[g]	Masse des feuchten Holzes

Tabelle 2-3: Umrechnungstabelle Wassergehalt zu Holzfeuchte

w [%]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
u [%]	5	11	18	25	33	43	54	67	82	100	122	150

Ferner wird der Wassergehalt bei einigen Disziplinen auf das Volumen der feuchten Stoffprobe bezogen. Zum Beispiel im Fachgebiet Bodenkunde spricht man von der Angabe des volumetrischen Wassergehaltes Θ . Dieser soll in der vorliegenden Arbeit erwähnt werden, da er häufig bei numerischen Materialfeuchtesimulationen Verwendung findet (Künzel 2018). Dies ist auf die üblicherweise räumliche Diskretisierung der Berechnungsmodelle in derartigen Simulationsverfahren zurückzuführen. Darin bilden ein-, zwei- oder dreidimensionale Raumelemente die Grenze der Stoffmengen- und Transportbilanzen. Der volumenbezogene Wassergehalt eignet sich daher ohne weitere Umrechnungen als Einheit für diese instationären Berechnungen. Das folgende Diagramm stellt den volumetrischen Wassergehalt Θ neben dem gravimetrischen Wassergehalt w in einen Zusammenhang mit der Holzfeuchte u . Dieser Zusammenhang gilt für das in dieser Arbeit verwendete Fichtenholz der thermisch aktivierten Massivholzelemente mit einer mittleren Rohdichte von 423 kg/m^3 .

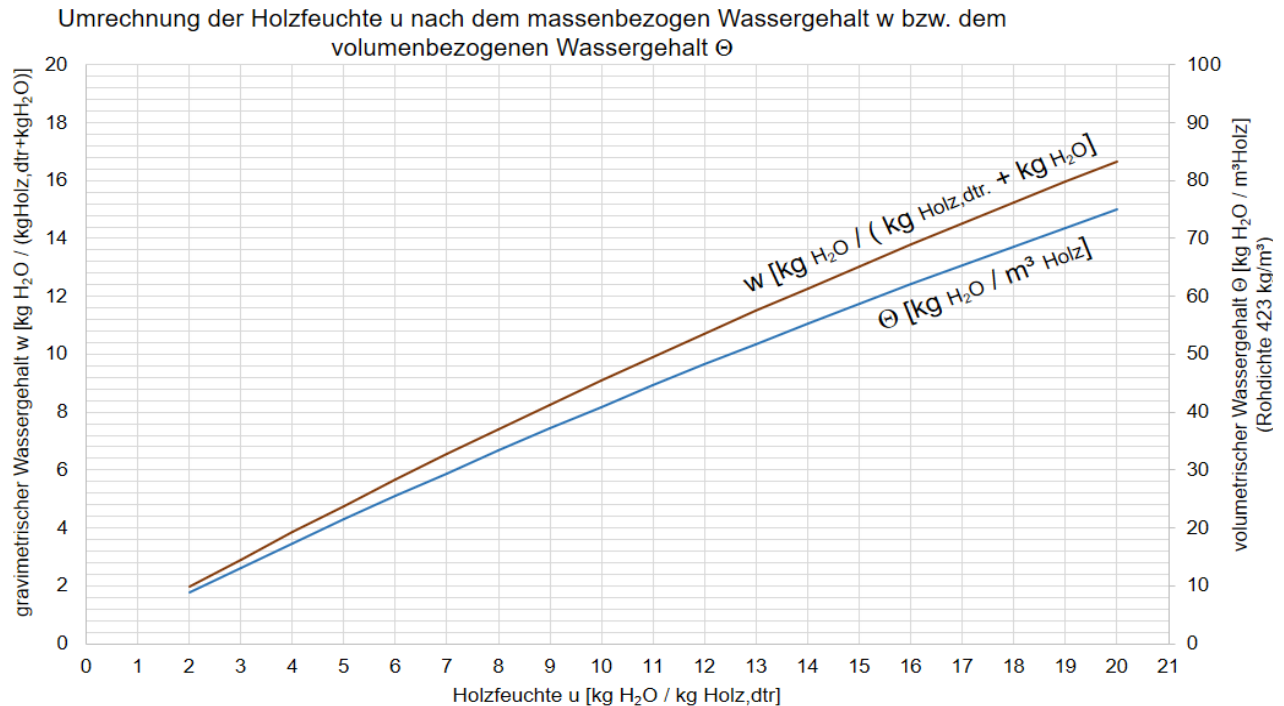


Abbildung 2.10: Zusammenhang zwischen der Holzfeuchte u und dem massebezogenen Wassergehalt w bzw. dem volumenbezogenen Wassergehalt Θ bei einer trocken-Rohdichte des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Brettsperrholzes von 423 kg/m^3

2.3.2 Bereiche der Holzfeuchte

In Abhängigkeit der Holzfeuchte werden zwei durch den Fasersättigungspunkt getrennte Bereiche mit drei Grenzzuständen unterschieden (vgl. Abbildung 2.11), die nach (Gamper/Dietsch/Merk 2013) wörtlich lauten:

- „① Wassersättigung (Grenzzustand): Die Zellwände und die Zellhohlräume des Holzes sind maximal mit Wasser gefüllt. Holzfeuchte $> 100 \%$
- ② Kapillarer Bereich: Durch Änderung des Wassergehaltes in den Zellhohlräumen (freies Wasser) schwindet oder quillt das Holz nicht, da die Fasern gesättigt bleiben und so keine Volumenänderung erfahren. Die Eigenschaften des Holzes sind weitestgehend unabhängig von der kapillaren Holzfeuchte. Holzfeuchte $> 30 \%$
- ③ Fasersättigungsbereich (Grenzzustand): die gesamten Zellwände des Holzes sind mit Wasser gefüllt, jedoch ist kein Wasser in den Zellhohlräumen vorhanden. Holzfeuchte $\sim 30 \%$
- ④ Hygroskopischer Bereich: Die Fasern sind nicht mehr gesättigt, es befindet sich nur noch gebundenes Wasser in den Zellwänden. Durch Änderung des Wassergehaltes in den Zellwänden bei Feuchteabgabe bzw. -aufnahme schwindet bzw. quillt das Holz. Die Eigenschaften des Holzes sind abhängig von der Holzfeuchte. Holzfeuchte $< 30 \%$
- ⑤ Darrtrockenes Holz (Grenzzustand): das Holz ist absolut trocken und es ist keinerlei Wasser vorhanden. Holzfeuchte $= 0 \%$ “

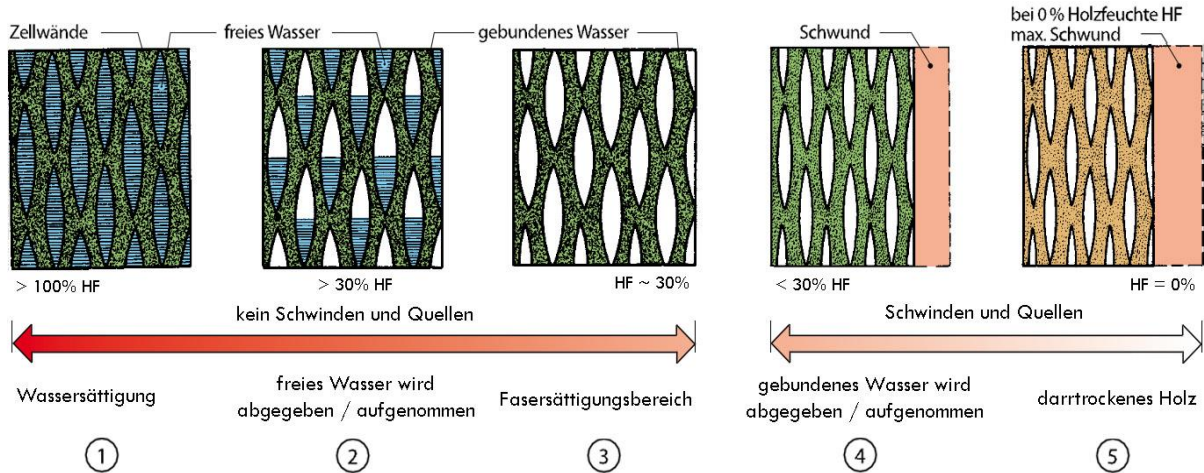


Abbildung 2.11: Wasseraufnahme und -abgabe des Holzes; aus: (Nutsch 2007)

Der Fasersättigungspunkt, oder präzise ausgedrückt, der Fasersättigungsbereich, ist die Grenze zwischen kapillarem und hygrokopischem Bereich und von großer praktischer Bedeutung. Bei gewöhnlichen europäischen Hölzern herrscht Fasersättigung im Bereich zwischen ca. 22 % und 35 % Holzfeuchte. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Holzarten werden durch Unterschiede im Zellwandfeinbau und im chemischen Aufbau hervorgerufen. Verallgemeinernd wird als ungefähre Kennwert für den Fasersättigungsbereich 28 % oder 30 % Holzfeuchte angesetzt. Unterhalb der Fasersättigung, genauer gesagt im hygrokopischen Bereich, treten bei Änderung der Holzfeuchte Form- und Volumenänderungen des Querschnitts in Form von Schwinden und Quellen auf (Schaf-rath 2015). Bedingt durch den strukturellen Aufbau des Holzes hängen viele physikalische und mechanische Eigenschaften unterhalb des Fasersättigungspunktes von der Holzfeuchte ab. Mit zunehmender Holzfeuchte:

- sinkt die Festigkeit des Holzes,
- steigt die Kriechverformung von Holz bei Langzeitbelastung,
- steigt die Wärmeleitfähigkeit des Holzes,
- steigt die Anfälligkeit für Pilzbefall des Holzes, v. a. über 20 % Holzfeuchte.

Die abnehmenden Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte sind nach (Blaß/Görlacher/Steck 1995) auf die Lockerung der Wasserstoffbindungen zwischen den Cellulosefasern im Holz bei steigendem Feuchtegehalt zurückzuführen.

Für die Bewertung von Holzfeuchtwerten und als Referenz für den Leser dieser Arbeit soll im folgenden Diagramm eine als repräsentativ eingeschätzte Holzfeuchteentwicklung bei konstruktiv eingesetztem Bauholz illustriert werden.

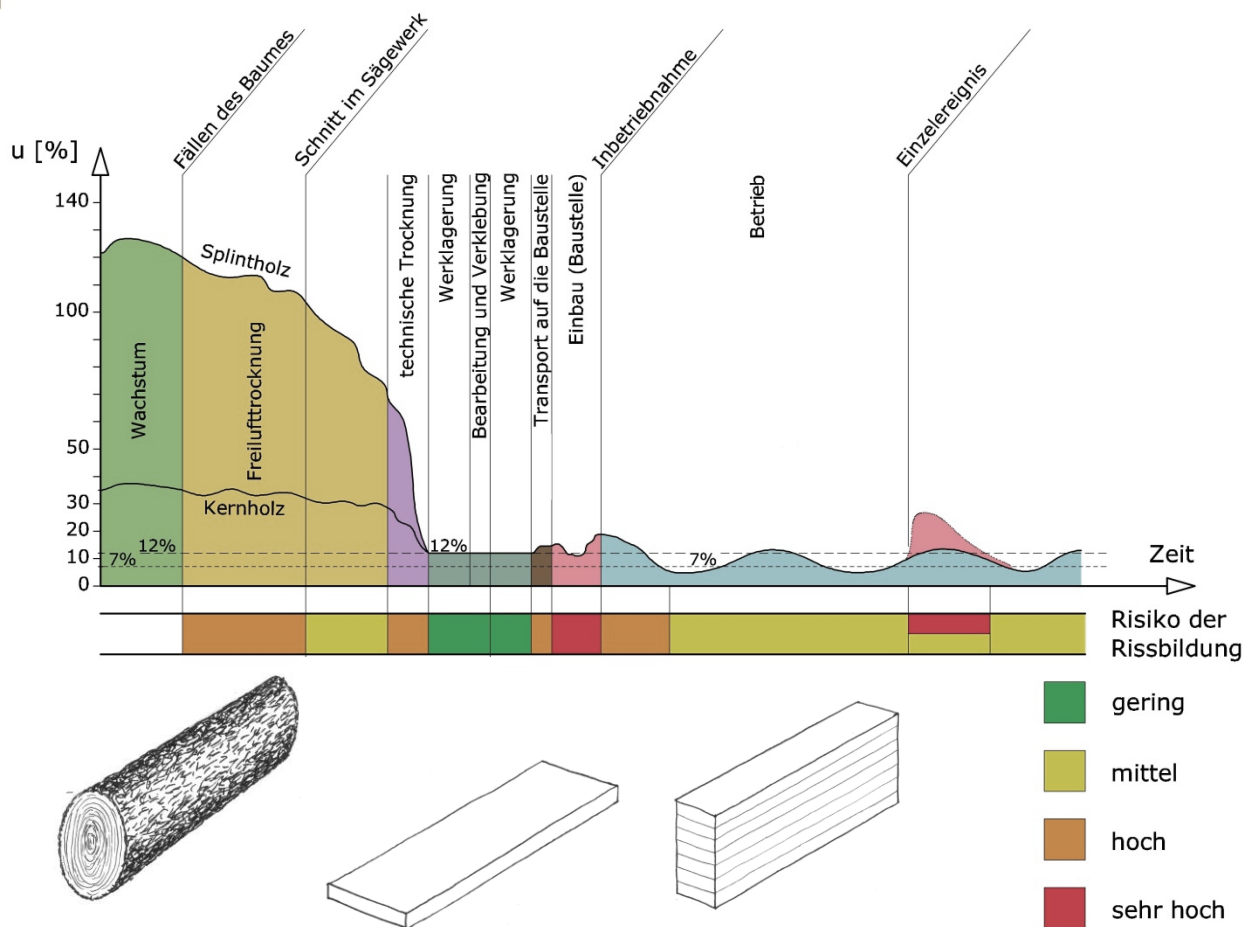


Abbildung 2.12: Skizze einer möglichen Holzfeuchteentwicklung und Wahrscheinlichkeitsbewertung von Rissentstehung vom Baum bis zum verbauten Brettchenschichtholz; in Anlehnung an: (Gammer/Dietsch/Merk 2013)

Das Diagramm stellt die Entwicklung der Holzfeuchte dar, beginnend mit dem Wachstumsstadium des Baumes über die forstwirtschaftliche und industrielle Verarbeitung bis hin zur Montage auf der Baustelle und dem anschließenden Betrieb im verbauten Zustand. Besonders auffällig ist die technische Trocknung im Sägewerk auf eine Holzfeuchte von ca. 12 %. Hierdurch soll eine spätere starke Feuchteveränderung und damit einhergehende Quell- und Schwindverformungen am Bauprodukt reduziert werden. Der rechte Bereich in dem Diagramm entspricht der Holzfeuchte im Ausgleichszustand zu dem Raumklima eines beheizten Gebäudes. Bei dieser Nutzung treten in der Regel im eingeschwungenen Zustand Holzfeuchten im Bereich $8\% < u < 12\%$ auf.

2.3.3 Mechanismen der Feuchtebindung im Holz

Dass Holz, aufgrund seines anatomischen Aufbaus, den Gesetzmäßigkeiten kapillarporöser Körper unterliegt, wurde bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt. Wie bei den meisten Baustoffen verändert sich daher bei unterschiedlicher Umgebungsluftfeuchte und Temperatur auch der Wassergehalt im Holz. Je mehr Wassermoleküle ein Luftvolumen enthält, desto leichter können diese sich an die Zelloberflächen im mikroskopischen Gefüge des Holzes anlagern. Dieser Vorgang wird allgemein als Sorption bezeichnet. Präzise gesagt, wird dabei je nach Holzfeuchte zwischen der Chemisorption, der Physisorption (Adsorption) und der Kapillarkondensation unterschieden. Steigt der Luftfeuchtegehalt, tritt, wie in Abbildung 2.13 gezeigt, ab einer bestimmten Holzfeuchte eine Sättigung der Holzzellenoberflächen ein. Dieser Holzfeuchtebereich wird als Fasersättigung bezeichnet. Steigt der Luftfeuchtegehalt weiter, werden die Wassermoleküle auch in die Makrostruktur des Holzes eingelagert.

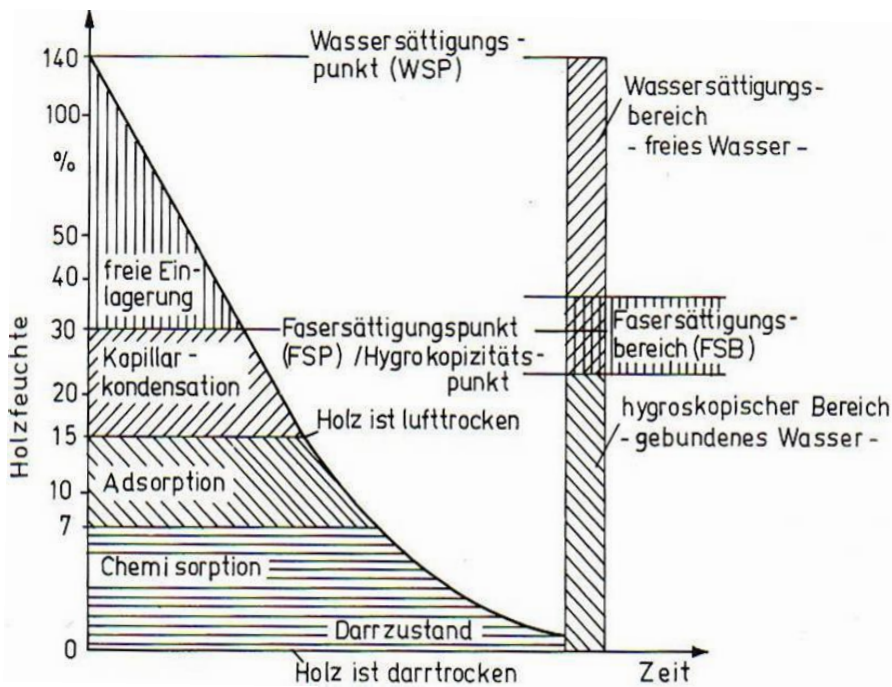


Abbildung 2.13: Wirksame Bindungsformen des Wassers in Abhängigkeit der Holzfeuchte nach (Niemz 1993)

Nach (Kollmann 1951) werden die drei Mechanismen während der folgenden Holzfeuchtebereiche wirksam, wobei sie sich auch partiell überlagern können:

- Chemisorption: $0 < u < 6 \%$
- Adsorption: $6 < u < 15 \%$
- Kapillarkondensation: $u > 15 \%$ bis Fasersättigungsbereich.

Chemisorption ($0 \% < u < 6 \%$; $\varphi \leq 20 \%$)

Die Chemisorption ist ab dem oder bis zum darrtrockenen Zustand des Holzes wirksam. Dabei kommt es zu einer Reaktion zwischen den Wassermolekülen und den Celluloseketten an den mikroskopischen Oberflächen der Holzzellen. Es kann eine Wasserschicht aus maximal einer Moleküllage angelagert werden, weshalb durch die Chemisorption nur wenig Wasser gebunden werden kann. Die dabei entstehenden starken chemischen Bindungen bedingen die hohe Aktivierungsenergie, die beim Darrtrocknen zum Lösen der letzten Wassermoleküle aus der Struktur des Holzes notwendig ist. Aus demselben Grund ist der Vorgang der chemischen Sorption verhältnismäßig langsam.

Adsorption ($6 \% < u < 15 \%$; $\varphi \leq 60 \%$)

Bei der Physiosorption (Adsorption) lagern sich die Wassermoleküle aufgrund molekularer Anziehungskräfte in den Poren des Mikrosystems an. Die Anziehung und Bindung der Wassermoleküle erfolgt durch Wasserstoffbrückenbindungen und durch Van-der-Waal'sche Kräfte zwischen den Zelloberflächen des Holzes und den Wassermolekülen. Diese elektrostatischen Kräfte wirken darüber hinaus auch zwischen den bereits an die mikroskopischen Holzoberflächen angelagerten Wassermolekülen und weiteren freien Wassermolekülen. So kann, anders als bei der Chemisorption, eine polymolekulare Schicht gebildet und mehr Wasser gebunden werden.

Kapillarkondensation ($15 \% < u < \text{Fasersättigungsbereich}$; $60 < \varphi < 100 \%$)

Durch den Vorgang der Kapillarkondensation kann im Holzfeuchtebereich zwischen 15 % und dem Fasersättigungsbereich weiteres Wasser kondensieren und an den Zellwandoberflächen gebunden werden. Das Kondensat lagert sich mit zunehmendem Feuchtegehalt immer mehr in die intermizellaren und interfibrillaren Hohlräume ein, bis sich die Zellwand nicht mehr weiter ausdehnen kann. Ist das gesamte Feuchteaufnahmepotenzial des Mikrosystems im Holzgefüge erschöpft, ist der Fasersättigungspunkt erreicht.

Freie Einlagerung

Weitere Wassermoleküle werden ab dem Fasersättigungspunkt in makroskopischen Hohlräumen eingelagert. Die freie Einlagerung von Wasser im makroskopischen Gefüge bedingt keine weiteren Quell- und Schwindverformungen, da die Zellwände bereits mit Wasser gesättigt sind (Siau 1984).

Sorptionsisothermen

Die zuvor beschriebenen Sorptionsmechanismen beschreiben die Art der Bindung von Wassermolekülen im mikroskopischen sowie im makroskopischen Gefüge des Holzes. Je nach Art und Stärke der Bindung kann unterschiedlich viel Wasser im Holz unterschiedlich schnell gebunden oder freigesetzt werden. Nach ausreichend langer Zeit der Lagerung einer Holzprobe in einem konstanten Umgebungsklima tritt ein Gleichgewichtszustand, die sogenannte Gleichgewichtsfeuchte, ein. Diese ist nach (Niemz/Sonderegger 2017) unter anderem abhängig von:

- der relativen Luftfeuchte,
- der Temperatur,
- dem Luftdruck und
- dem chemischen und strukturellen Aufbau des Holzes.

Für praktische Anwendungszwecke werden die einzelnen Sorptionsmechanismen nicht separat berechnet, sondern kombiniert, als empirisch ermittelte Gesamtfunktion dargestellt. Diese Funktion wird allgemein als Sorptionsisotherme bezeichnet und stellt den materialspezifischen Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte, der Temperatur, dem Luftdruck und der daraus resultierenden Materialausgleichsfeuchte dar.

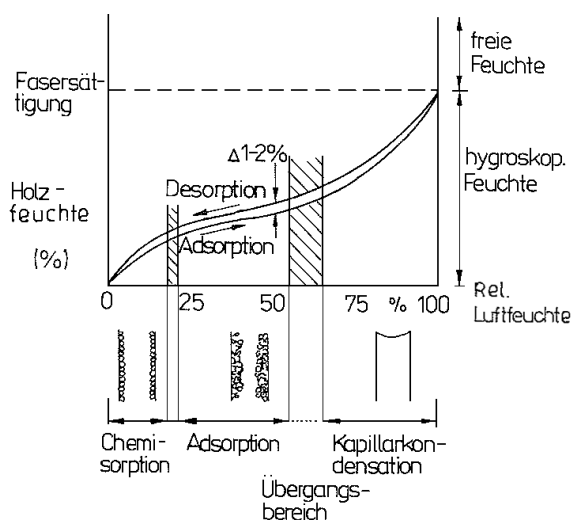


Abbildung 2.14: Ad- und Desorptionsisotherme als Funktion der materialspezifischen Ausgleichsfeuchte und der relativen Luftfeuchte, der Temperatur und des Luftdrucks; aus: (Niemz/Sonderegger 2017)

Tatsächlich verlaufen Ad- und Desorptionsisotherme nicht deckungsgleich. Diese natürliche Hysterese ist darauf zurückzuführen, dass die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme durch das Holz im Allgemeinen höher ist als die der Wasserabgabe.

Für bauphysikalische Berechnungen wird meistens die Mittelwertkurve aus den Sorptionsisothermen bzw. nur die Kurve der Feuchteaufnahme herangezogen.

In Abbildung 2.15 stellt (Niemz 1993) anhand von Sitka-Fichte den Einfluss von Temperatur und relativer Luftfeuchte auf die Holzfeuchte dar.

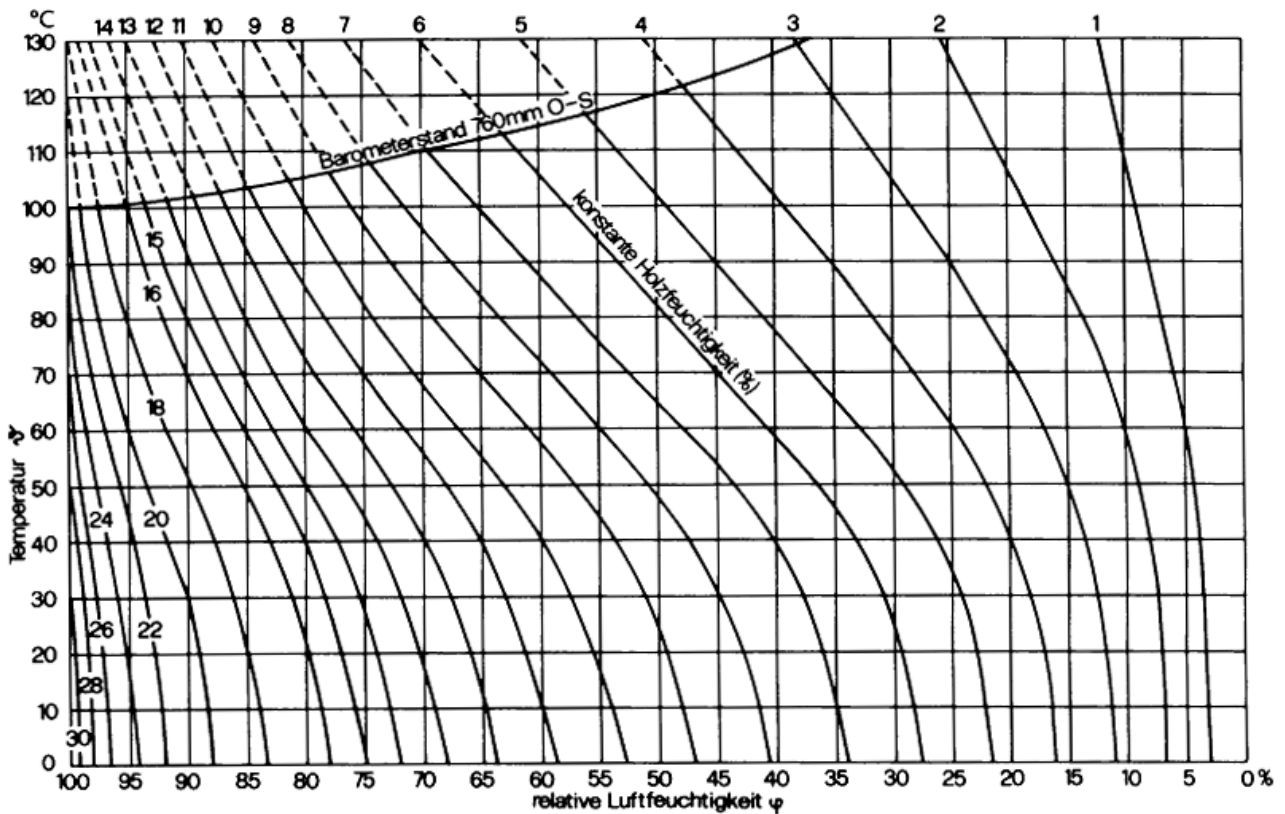


Abbildung 2.15: Sorptionsisothermendiagramm für Sitka-Fichte in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte; aus: (Niemz 1993) mit Daten von Loughborough von (Hawley, L., F. 1931) dargestellt und von (Keylwerth 1949) ins metrische System umgerechnet

Holz im Bauwesen erreicht seine spezifische Ausgleichsfeuchte über den gesamten Querschnitt aufgrund recht großer Querschnittsmaße und wechselhafter Klimabedingungen praktisch nie. Präzise Angaben über die Ausgleichsgeschwindigkeit der Holzfeuchte sind bislang kaum bekannt (Niemz 1993), (Schaffrath 2015).

2.3.4 Mechanismen des Feuchtetransports im Holz

Seit vielen Jahrzehnten ist der Transport von Wasser im Holz Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Bereits (Kollmann 1951) spricht von kontroversen Auseinandersetzungen bei der mathematischen Beschreibung der Feuchtetransportvorgänge im Holz. Eine exakte analytische Formulierung der einzelnen Vorgänge in praxistauglichen Modellen sei bisher kaum möglich. Laut (Schaffrath 2015) hat diese Aussage im Wesentlichen auch heute noch Bestand. Im Folgenden soll sich durch eine Diskussion der analytischen Zusammenhänge und einem Verweis auf empirische Modelle einer Beschreibbarkeit der Mechanismen des Feuchtetransports im Holz genähert werden.

Grundsätzlich wird bei der Beschreibung des Feuchtetransports im Holz zwischen den Vorgängen oberhalb des Fasersättigungsbereichs, d. h. im kapillaren Bereich, und unterhalb des Fasersättigungsbereichs, dem sogenannten hygroskopischen Bereich, unterschieden.

Dabei kann das Wasser im Holz durch unterschiedliche Mechanismen transportiert werden. Für die Betrachtung von Feuchtetransportvorgängen in Holzbauteilen sind nach (Holm 2001) folgende drei Mechanismen von Bedeutung:

- Wasserdampfdiffusion
- Oberflächendiffusion
- kapillares Saugen

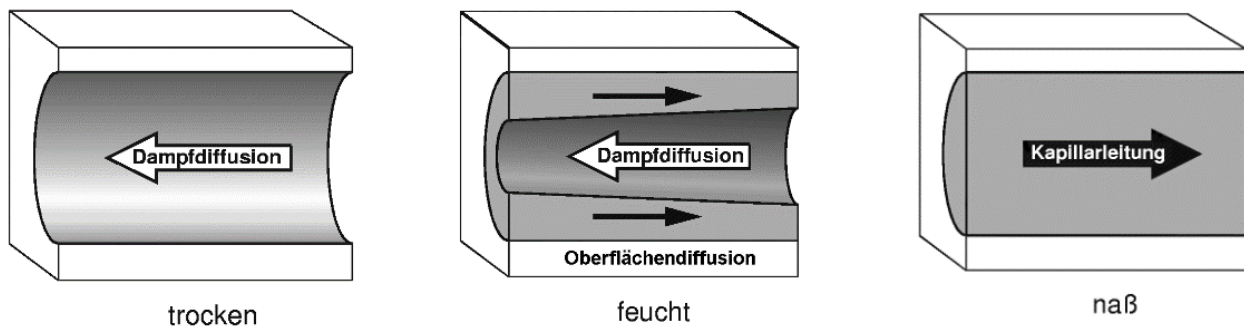


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung des Feuchtetransports in Baustoffporen abhängig von der Baustofffeuchte; aus: (Künzel 1994)

In der Abbildung 2.16 sind die genannten Mechanismen des Wassertransports mit Richtungspfeilen dargestellt. Damit soll die Schwierigkeit beschrieben werden, die aus der teilweise gegenläufigen Tendenz dieser Prozesse resultiert. Zum einen sind je nach Feuchtebereich diverse Vorgänge unterschiedlich stark wirksam und zum anderen können sich diese je nach Feuchtebereich gegenseitig verstärken oder abmindern.

Wasserdampfdiffusion und Effusion

Unterhalb der Fasersättigung wird der Wassertransport im Holz maßgeblich durch den Vorgang der Wasserdampfdiffusion bestimmt. Dabei handelt es sich um die Bewegung gasförmiger Wassermoleküle im Holz entlang eines Dampf-Konzentrationsgefälles. Mit dem naturgesetzmäßigen Ziel, einen räumlichen Konzentrationsausgleich zu erreichen, werden die Wasserdampfteilchen von einem Bereich höherer Konzentration in einen Bereich mit niedrigerer Konzentration forciert. Die bewegende Kraft resultiert aus der elektrostatisch abstoßenden Wirkung gleichnamig geladener Teilchen. Je höher die Konzentration von gleichgeladenen Wasserdampfmolekülen in einem Volumen ist, desto größer deren abstoßende Wirkung untereinander und desto größer der von diesen Teilchen ausgehende Druck. Da dieser Wasserdampfmolekül-Druck, neben den Drücken der anderen Teilchen in einem Luftvolumen, nur einen Teil des Gesamtdrucks ausmacht, spricht man von einem Gas-Teildruck, respektive dem Wasserdampfpartialdruck.

Eine mathematische Beschreibung der freien Wasserdampfdiffusion in einem Gasvolumen liefert das Fick’sche Gesetz. Dieses allein kann jedoch die reale Diffusion von Wasserdampf durch ein poröses Material wie Holz nicht beschreiben, da die Beweglichkeit der Gasmoleküle auf die Volumina der Holzporen begrenzt ist. Dabei wird die freie Diffusion in den engen Poren durch Zusammenstöße der Wassermoleküle mit der Porenwand geprägt. Wird der Porendurchmesser kleiner als die mittlere freie Weglänge der Wassermoleküle (ca. 80 nm), bezeichnet man diesen Effekt als Effusion. Für die baupraktische Berechnung können Wasserdampfdiffusion und Effusion mit Hilfe der folgenden empirischen Gleichung nach (Holm 2001) und (Künzel 1994) zusammengefasst werden:

$$\dot{g}_v = -\frac{\delta}{\mu} \nabla p \quad [\text{kg/m}^2\text{s}] \quad (2-5)$$

\dot{g}_v	[kg/m ² s]	Wasserdampfdiffusionsstromdichte
δ	[kg/msPa]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
μ	[-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
∇	[-]	Nabla-Operator
p	[Pa]	Wasserdampfpartialdruck

Baupraktisch spielt die Diffusion deshalb eine wichtige Rolle, da innerhalb eines Gebäudes regelmäßig ein deutlich höherer Wasserdampfpartialdruck vorliegt als draußen. Dieses Diffusionspotential bewirkt einen Wasserdampftransport durch die Gebäudehülle, der bei Unterschreitung der Taupunkttemperatur eine Kondensation des Wasserdampfes im kalten Bereich des Bauteils zur Folge hat. Abhängig vom Wasserdampfpartialdruckgefälle und von der Dampfdurchlässigkeit des Bauteils können kritische Mengen von Wasser im Bauteil kondensieren und zu entsprechenden Schäden führen.

Oberflächendiffusion

Gekoppelt an die zuvor genannte Wasserdampfdiffusion, welche die Ausbreitung gasförmiger Wassermoleküle in einem Luftvolumen beschreibt, geht es bei der Oberflächendiffusion um die Bewegung von Wassermolekülen in einem dünnen Wasserfilm an den inneren und äußeren Zelloberflächen des Holzes. Dieser Sorbatfilm wird dicker, je höher die relative Luftfeuchte ist. Zwar handelt es sich bei diesem Vorgang um eine Art der Diffusion, da sie aber im Flüssigkeitsfilm der Porenwände vorkommt, zählt sie wie die Kapillarleitung zum Flüssigtransport. Im Gegensatz zur Kapillarleitung, die fast ausschließlich im überhygroskopischen Bereich vorkommt, tritt die Oberflächendiffusion schon im Sorptionsfeuchtebereich auf (Künzel 1994).

Lösungsdiffusion

Die Lösungsdiffusion beschreibt die Bewegung der Wassermoleküle in einem flüssigen Stoff. Die Wassermoleküle sind halb oder ganz in einer Flüssigkeit oder einem Gel gelöst. Das heißt, die Moleküle des durchwanderten Körpers dürfen nicht kristallin sein.

Dies trifft auf quellbare, organische Polymere wie beispielsweise Gummi, Bitumen, Kunststoffe und Beschichtungen auf Basis organischer Polymere sowie Flüssigkeiten zu. Die Lösungsdiffusion wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiterführend betrachtet.

Kapillarwirkung

Oberhalb des Fasersättigungsbereiches, im überhygroskopischen Bereich, erfolgt die Aufnahme und Weiterleitung von freiem, tropfbarem Wasser über Kapillare im Makrosystem des Holzes. Nach (Kollmann 1951) entsteht die Wasserbewegung in gefüllten Kapillaren des Holzes durch Zugunterschiede, die sich aufgrund der Oberflächenspannungskräfte in den Menisken der Kapillaren ergeben.

Analog zu Dampfdiffusion und Effusion treten auch die Kapillarleitung und die Oberflächendiffusion meist gleichzeitig auf, weshalb sie auch nach Künzel (1994) in der empirischen Gleichung (2-6) gemeinsam berücksichtigt werden.

$$\dot{g}_w = -D_\varphi \nabla \varphi \quad [\text{kg/m}^2\text{s}] \quad (2-6)$$

\dot{g}_w	[kg/m ² s]	Flüssigtransportstromdichte
D_φ	[kg/ms]	Flüssigleitkoeffizient
φ	[-]	relative Feuchte
∇	[-]	Nabla-Operator

Der Flüssigleitkoeffizient ist dabei abhängig von der Temperatur, die die Oberflächenspannung und Viskosität des Wassers beeinflusst (Künzel 1994).

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Kapillarleitung zur Vollständigkeit der Grundlagenerläuterung genannt. In Massivholzelementen, welche konstruktiv innerhalb eines Gebäude eingesetzt werden, sollte tropfbares Wasser und in dessen Folge der Prozess der Kapillarwirkung nicht planmäßig auftreten. Dem gegenüberstehend sind frei bewitterte Fassadenbekleidungen zu nennen, bei denen die Wasserverteilung nach einem Regenereignis durch die kapillare Wirkung des Holzbauteils geschieht.

Betrachtung auf Bauteilebene für Brettsperrholz

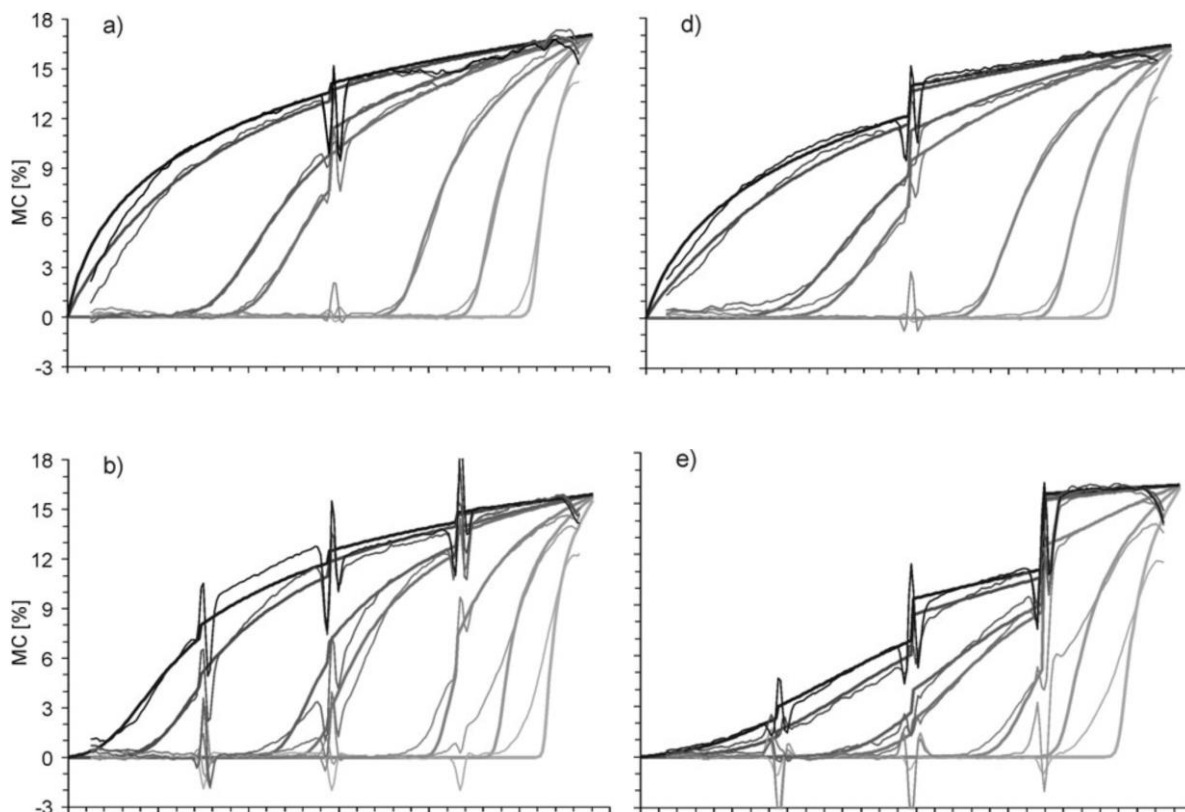
In diesem Abschnitt soll der Blick auf das Wassertransportverhalten von Holz auf Produktebene, konkret auf das Produkt Brettsperrholz, gerichtet werden. Da die Klebefugen zwischen den Holzschichten des Brettsperrholzes den Wassertransport quer durch das Bauteil in hohem Maße beeinflussen und gleichzeitig die Modellierung der Lagerichtung der Jahresringe in den einzelnen Lamellen (tangential oder radial) nicht zweckmäßig erscheint, wird für die technische Beschreibung des Wassertransportes der sogenannte Diffusionskoeffizient genutzt.

Der Diffusionskoeffizient ist ein Maß für die Beweglichkeit von Teilchen in einem Medium wie in diesem Fall von Wassermolekülen im Molekülgitter des Klebers oder in der Zellstruktur des Holzes.

Hierzu wurde im Jahre 2010 ein Untersuchungsbericht zur quantitativen Bestimmung der Diffusion von gebundenem Wasser in mehrlagigen Brettlamellen mittels Neutronenradiographie veröffentlicht (Sonderegger et al. 2010). Es wurden Diffusionsprozesse an mehrlagigen Proben von Fichtenholz, welche einem Differenzklima (trocken/feucht) ausgesetzt waren, untersucht und quantifiziert. Die Proben wurden in zwei Serien über einen Zeitraum von circa zehn Wochen untersucht. Während dieser Zeit wurden die vorab darrgetrockneten Probekörper einem Differenzklima unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit ausgesetzt:

- Serie 1: 20 °C Lufttemperatur / 85 % relative Luftfeuchte zu annähernd 0 %
- Serie 2: 20 °C Lufttemperatur / 90 % relative Luftfeuchte zu annähernd 0 %

Für die Verklebung der Proben wurden unterschiedliche Klebstoffe verwendet: (Polyvinylacetat (PVAc), Harnstoff-Harz (UF), Epoxidharz (EP) und Einkomponenten-Polyurethan (1K-PUR)). Der Feuchtegehalt der Proben wurde mittels Neutronenradiographie in bestimmten Zeitintervallen gemessen, um den Diffusionsprozess in die Proben nachzuverfolgen. Anschließend konnten die Diffusionskoeffizienten für die Klebstoffe sowie für das Fichtenholz in radialer und tangentialer Richtung in Abhängigkeit der schon vorhandenen Feuchte berechnet werden. Die Klebstoffe 1K-PUR und EP wiesen dabei bis zu drei Zehnerpotenzen niedrigere Diffusionskoeffizienten auf als das Fichtenholz. In der folgenden Abbildung zeigt Sonderegger die zeitliche Änderung der Holzfeuchte entlang der Probenhöhe. Es wird ersichtlich, dass der Diffusionswiderstand der Klebstoff-fugen stark von der Klebstoffart abhängt.



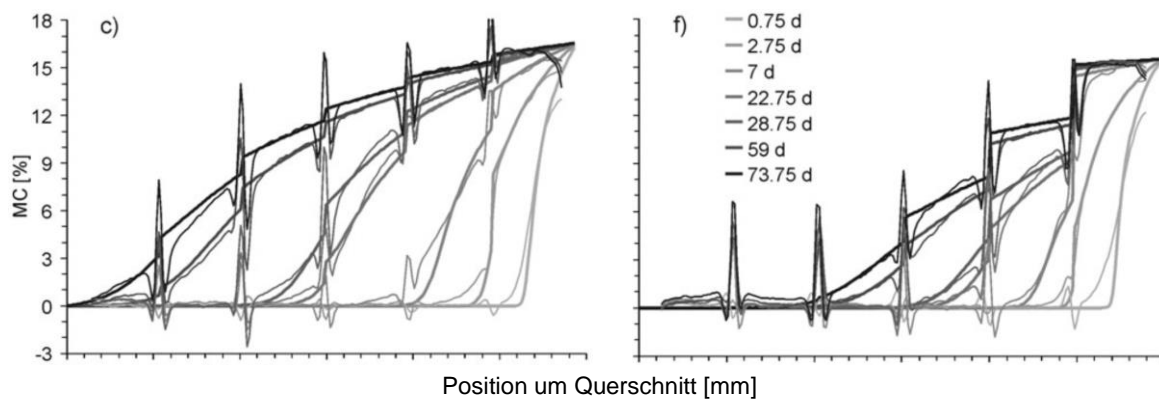


Abbildung 2.17: Profile des Feuchtegehalts durch die Proben der Serie 1 mit 1, 3 und 5 Klebefugen während des Diffusionsprozesses (feine Linien = experimentelle Werte; fette Linien = berechnete Kurven); (a-c) UF, (d-f) 1K-PUR; aus (Sonderegger et al. 2010)

Außerdem kann für einige Klebstoffe eine Abhängigkeit des Diffusionswiderstandes vom Feuchtegehalt beobachtet werden. Je mehr Klebstoffugen im Probekörper vorhanden sind, desto langsamer kann sich die Wasserdampfkonzentration über den Querschnitt des Probekörpers ausgleichen (Sonderegger et al. 2010).

Für die weiteren Betrachtungen liegt der Fokus auf dem Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoff, welcher bei dem in diesem Projekt näher betrachteten Binderholz-Brettsperrholz verwendet wird. Dieser weist im Versuch von Sonderegger mit $\mu_{\text{Kleber}} = 6500$ einen 163-mal höheren Wasserdampfdiffusionswiderstand auf, bei gleicher Schichtstärke, als das gemessene Fichtenholz mit $\mu_{\text{Fichte}} = 40$. Hieraus ergibt sich für die ca. 0,1 mm starke Klebefläche eine äquivalente Schichtstärke des Fichtenholzes von 16,3 mm (Sonderegger et al. 2010).

Für die baupraktische Anwendung kann zur Beurteilung des Feuchteschutzes in Brettsperrholzelementen üblicher Stärke von einer diffusionshemmenden und dadurch dampfbremsenden Wirkung ausgegangen werden. Somit sind Brettsperrholzkonstruktionen in der Regel ohne weitere dampfbremsende Schichten ausführbar. Zusätzlich ist Brettsperrholz ab drei kreuzweise verklebten Brettlagen als luftdicht einzuschätzen. Im Bereich der Bauteilstöße zweier Brettsperrholzelemente kann die Luftdichtheit z. B. mit Kompressionsbändern oder Dichtungsschläuchen hergestellt werden (Mestek, P., Werther, N., & Winter, S. 2012).

2.3.5 Hygrothermische Pufferwirkung von Holzwerkstoffen – der ‚Latentwärmeeffekt‘

Bei der Aggregatzustandsänderung eines Stoffes wird Energie umgewandelt. Beispielsweise wird beim Verdampfen von Wasser eine bestimmte Menge an thermischer Energie aus der Umgebung entzogen, um die physikalische Bildung zwischen den Wassermolekülen im flüssigen Zustand zu lösen. Dieser Effekt tritt bei Phasenübergängen in beide Richtungen auf.

Die Wärme oder Enthalpie, die aufgewendet werden muss, um einen flüssigen Stoff zu verdampfen, wird beim Kondensieren wieder frei. Die spezifische Verdampfungsenthalpie Δh_v beträgt für Wasser 2441,2 kJ/kg (Kabelac 2006). Durch Multiplikation dieses Wertes mit der Masse des kondensierenden Wassers, lässt sich berechnen, wie viel Energie beim Kondensieren vom Wasser auf die Wand übergeht. Abbildung 2.18 zeigt in einer dreidimensionalen Darstellung, wie sich die Temperatur erhöht, wenn kondensierende Feuchtigkeit aufgenommen wird.

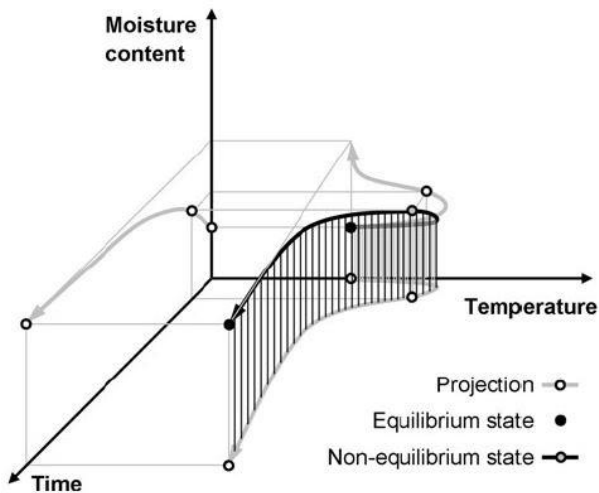


Abbildung 2.18: Schematische Darstellung eines Adsorptionsprozesses in einem dreidimensionalen Feuchtegehalt-Temperatur-Zeit-System. Konzept von (Engelund et al. 2012)

Nähert sich die Materialfeuchte einem konstanten Zielwert an, verringert sich die durch Kondensation freigesetzte Wärmeleistung und die Temperatur sinkt nach einer gewissen Zeit wieder. Die durch Kondensation aufgenommene Wärme wird dann wieder durch Transmission, Konvektion und Strahlung an die Umgebung abgegeben. Ein zusätzlicher Effekt tritt auf bei der Sorption des kondensierten Wassers an der Oberfläche eines hygroskopischen Materials. Die Enthalpie von gebundenem Wasser ist niedriger als jene von flüssigem Wasser. Deswegen muss nach (N.N.; Kraniotis et al. 2016) die differenzielle Sorptionswärme ΔH_s addiert werden, um die gesamte Wärme zu berechnen, die bei der Kondensation mit anschließender Sorption frei wird.

$$H_s = \frac{S * \rho_m * d_m * \Delta MC * h_v}{t} \quad \text{[kWh]} \quad (2-7)$$

H_s	[kWh]	Sorptionsenthalpie
h_v	[J/kg]	spezifische Verdampfungsenthalpie
S	[m ²]	Hygroskopisch aktive Fläche
ρ_m	[kg/m ³]	Rohdichte des Bauteils
$\Delta \omega$	[%]	Änderung des Wassergehaltes
d_m	[m]	Eindringtiefe
t	[s]	Zeit

Bei der Bestimmung der hygrysch wirksamen Schichtstärke nahm (Kraniotis et al. 2016) für seine Berechnungen vereinfacht 10 mm an. Seine Simulationen deuten an, dass die Sorptionswärme in gewissen Fällen, bei ausreichend hygroskopischer Fläche und großer Änderung der Materialfeuchte, einen signifikanten Wärmegewinn darstellt. In einem untersuchten Fall können 30 % der Transmissionswärmeverluste der Bauteile durch die Freisetzung der Kondensations- und Sorptionswärme für einen kurzen Zeitraum kompensiert werden. Allerdings muss die freigesetzte Wärme zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgewendet werden. Vereinfacht gesagt handelt es sich dabei um eine Erhöhung der sensiblen-/thermischen Speichermasse an hygrysch aktiven Oberflächen.

Für die additive Berücksichtigung beider Effekte wurde in Norwegen der Begriff der `hygrothermischen Speichermasse` eingeführt. In ihrer Untersuchung zu Energieeinsparpotenzialen durch Holzoberflächen in Bädern deuten Nore und Olsson ebenfalls auf signifikante Energieeinsparpotenziale durch die Nutzung der hygrothermischen Pufferwirkung von Holzoberflächen in Badezimmern hin. Jener dort beschriebene Energieeinspareffekt beruht darauf, dass der beim Duschen freigesetzte Wasserdampf von hygroskopisch wirksamen Oberflächen wie Holz adsorbiert wird. Beim Anlagern der Wasserdampfteilchen an die raumseitige Holzoberfläche durchlaufen diese einen Phasenwechsel von gasförmig auf flüssig und geben ihre latente Energie an die adsorbierende Oberfläche ab. Diese latente und durch Sorption freigesetzte Energie erwärmt darauf hin, ausgehend von den Holzoberflächen, die operative Raumtemperatur um 2 - 5 °C (Nore/Olsson 2014). Da dieser Vorgang zeitgleich zum Duschvorgang stattfindet bzw. diesen einige Minuten überdauert, kann die auslegungsgemäß um permanent 4 °C⁵ erhöhte Raumtemperatur in Badezimmern durch den Einsatz von Holzoberflächen dann auf das für die restlichen Räume übliche Auslegungstemperaturniveau von 20 °C abgesenkt werden. Schließlich ist die Temperaturerhöhung der Badezimmer lediglich durch die wenigen Minuten zwischen Verlassen der Dusche und Ankleidevorgang begründet.

Weitere mögliche passive Energieeinspareffekte sind auch für den Kühlbetrieb denkbar, wenn während der Kühlperiode in einem Raum eine unerwünschte Erwärmung der Raumlufttemperatur, beispielsweise durch eindringende Solarstrahlung oder sonstige interne thermische Lasten stattfindet. Bei Räumen mit hygroskopisch aktiven Oberflächen finden drei, in diesem Zusammenhang zu nennende Effekte statt. Der erste Effekt betrifft die Raumluft. Die oben beschriebenen Beispiele einer sensiblen Erwärmung der Raumluft führen zu einer Erhöhung des Sättigungsdampfdrucks und bei gleichbleibender Wasserdampfbeladung zu einer Reduzierung der relativen Luftfeuchte. Der zweite Effekt betrifft die Holzoberfläche des Raumes. Betrachtet man das in Abbildung 2.15 gezeigte

⁵ In der sogenannten Heizlastnorm, der DIN EN 12831-1:2017-09 Tabelle B.14, werden für unterschiedliche Raumarten Norm-Innenraumtemperaturen für die Berechnung der Raumheizlast empfohlen. Demnach wird das Heizsystem eines Wohnraumes auf 20 °C und das Heizsystem eines Bade- und Duschräume auf 24 °C ausgelegt. Entsprechend des planmäßigen Bekleidungsgrades soll so in allen Räumen die angemessene Komforttemperatur erreicht werden.

Sorptionsisothermendiagramm für Fichtenholz wird ersichtlich, dass sich bei Temperaturerhöhung der Holzoberfläche die Holzausgleichsfeuchte reduziert.

Dies geschieht, da die sogenannte Van-der-Waals'sche Bindungsenergie zwischen Holz- und Wassermolekülen einer erhöhten thermischen Energie des Molekülgitters im Holz entgegensteht, die ab einer bestimmten Temperatur die Bindung zwischen dem Holz und dem Wasser löst. Die am Holz sortierten Wasserteilchen verdampfen und entziehen dabei der Holzoberfläche Wärme, was zu einer Abkühlung der Oberfläche führt. Es kann also neben der rein sensibel-thermischen Speicherwirkung der Massivholzoberfläche auch von einer puffernden latent-thermischen Speicherwirkung ausgegangen werden. Der dritte Effekt betrifft die Pufferung der relativen Raumlufffeuchte. Die hygroskopischen Oberflächen des Raumes wirken ausgleichend auf plötzliche Feuchteveränderungen der Raumluff. Steigt die relative Raumlufffeuchte, werden Wasserdampfteilchen adsorbiert. Sinkt die relative Luftfeuchte, werden einige der am Holz angelagerten Wassermoleküle desorbiert und an die Raumluff zurückgegeben. Dieser Ausgleichseffekt kann positiv für das hygro-thermische Raumklima bewertet werden.

Einschränkend ist anzumerken, dass diese Effekte nicht in allen Raumklimatisierungsszenarien energiesparend wirken, sondern in bestimmten Fällen auch der Raumklimatisierungsenergie entgegenwirken können. Ein Beispiel hierfür ist eine erhöhte Kühlleistung bei auftretenden Wärme- und Feuchtelasten wie sie von Lebewesen in Räumen hervorgerufen werden kann. Der zum Beispiel von den Personen abgegebene Wasserdampf führt mittelbar zu einer erhöhten Sorption und damit zu einer Temperaturerhöhung an der hygroskopischen Oberfläche. In dem Fall wäre die sensible Kühlleistung des Raumes geringfügig zu erhöhen um die entsprechend angehobene Strahlungstemperatur zu kompensieren.

2.4 Thermische Vorgänge und Eigenschaften von Holz

2.4.1 Erläuterung zum Aufbau des Kapitels

In diesem Abschnitt sollen die systemspezifischen theoretischen Grundlagen für die Beschreibung der thermodynamischen Vorgänge in dem zu entwickelnden System erläutert werden. Die Interdisziplinarität dieser Arbeit und der integrale Charakter der thermisch aktivierten Massivholzelemente bedingen eine sehr breit gefächerte thematische Ausrichtung dieses Kapitels. Um dem Leser der Arbeit ein unzumutbares Maß an Grundlagenlektüre zu erübrigen, wird die Grundlagenelerklärung bereits schwerpunktmäßig auf die Funktionsbeschreibung des Entwicklungsobjektes ausgerichtet.

2.4.2 Mechanismen des Wärmetransportes

Nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik besitzt jedes ruhende System eine innere Energie U , die, dem Energieerhaltungssatz folgend, weder erzeugt noch vernichtet werden kann. Ihr Betrag kann sich ausschließlich durch einen Energietransport über die Systemgrenzen hinaus verändern. Dieser Energietransport kann durch die folgenden drei Formen geschehen:

- durch das Verrichten von Arbeit,
- durch den Übergang von Wärme und
- durch den Transport von Materie.

So ergibt sich die Leistungsbilanzgleichung in einem offenen System zu:

$$\frac{dU}{dt} = \sum \dot{Q}(t) + \sum \dot{W}(t) + \sum \dot{m}(t) * (h + gz + \frac{1}{2}c^2) \quad [\text{J/s}] \quad (2-8)$$

U	[J]	Innere Energie
t	[s]	Zeit
$\dot{Q}(t)$	[W]	Summe aller zu- und abfließenden Wärmeströme
$\dot{W}(t)$	[W]	Summe aller zu- und abfließenden Arbeitsströme (\triangleq Leistung $P(t)$)
$\dot{m}(t)$	[kg/s]	Summe aller Massenströme
h	[J/kg]	spezifische Enthalpie
gz	[J/kg]	spezifische potenzielle Energie mit z = Höhe über Bezugsniveau [m]
$\frac{1}{2}c^2$	[J/kg]	spezifische kinetische Energie mit c = Geschwindigkeit [m/s]

In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf dem Energietransport durch den Übergang von Wärme. Klarstellung: Hierzu wird auch der Wärmeübergang durch Konvektion gezählt, was mitunter zu Verwechslungen mit dem Energiestrom durch den Transport von Materie gemäß der Gleichung (2-8) führen kann. Letzterer, auch als Latentwärmestrom oder Enthalpiestrom bezeichnet, wird näher in Abschnitt 2.3 behandelt. Der in diesem Abschnitt erläuterte Übergang von sensibler Wärme wird durch den 2. Hauptsatz der Thermodynamik beschrieben. Demnach ist der Wärmestrom stets vom System höherer thermodynamischer Temperatur, entlang des Temperaturgefälles, zum System niedrigerer Temperatur gerichtet (Baehr/Kabelac 2016). Dieser Wärmestrom kann dabei auf drei unterschiedliche Arten erfolgen:

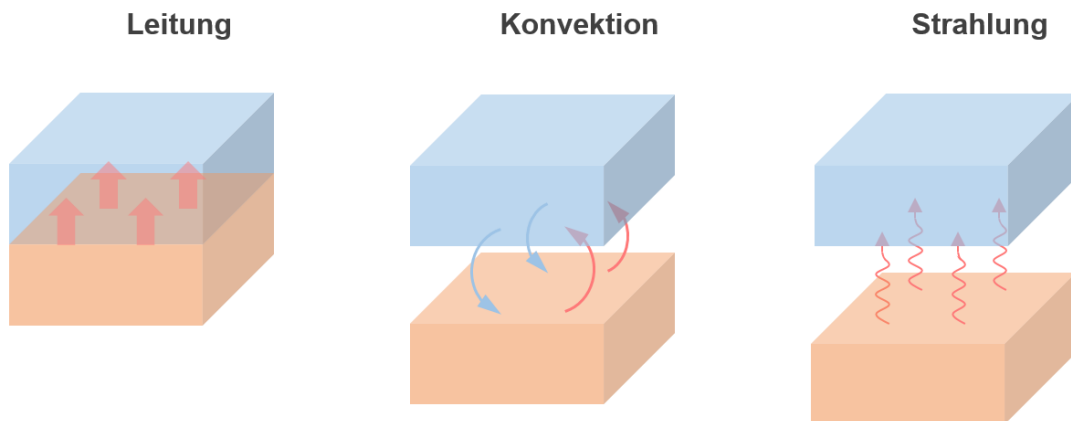


Abbildung 2.19: Schematische Darstellung der Wärmetransportmechanismen

In den folgenden Abschnitten werden die physikalischen Modelle für die Wärmeübertragungsarten erläutert. Dabei wird, dem Ziel der vorliegenden Arbeit entsprechend, der Schwerpunkt auf die Besonderheiten der Wärmeübertragung in Holzbauteilen gelegt.

2.4.3 Wärmeleitung

Wärmeleitung findet in festen oder ruhenden Stoffen statt. Der Wärmeübertrag erfolgt auf Molekülebene durch die Übertragung kinetischer Energie von stark schwingenden Atomen oder Molekülen zu benachbarten, schwach schwingenden Atomen oder Molekülen. Je wärmer ein Stoff ist, desto stärker die Schwingung seiner Teilchen. Der Wärmetransport ist daher an eine Temperaturdifferenz gebunden und findet vom Ort höherer Temperatur (stark schwingende Teilchen) zum Ort niedrigerer Temperatur (schwach schwingende Teilchen) statt.

Betrachtet man bei der Wärmeleitung die Änderung der Temperatur nur über den Ort und unabhängig von der Zeit, spricht man von stationärer Wärmeleitung. Hierbei ist die pro Zeiteinheit übertragene Wärmemenge konstant und ergibt sich unter Annahme eines eindimensionalen Wärmetransports nach der folgenden Gleichung (2-9).

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot (T_{s1} - T_{s2}) \quad [\text{J/s}], [\text{W}] \quad (2-9)$$

\dot{Q}	[W]	Wärmestrom durch Transmission, absolut
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des Stoffes
d	[m]	Schichtstärke des Bauteils
A	[m ²]	Fläche, durch die die Wärme strömt
T_{si}	[K], [°C]	Temperatur der jeweiligen Oberfläche

Wird der Wärmestrom auf die wärmeübertragende Fläche bezogen, so erhält man die Wärmestromdichte im Material:

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{d} \cdot (T_{s1} - T_{s2}) \quad [\text{J/sm}^2], [\text{W/m}^2] \quad (2-10)$$

\dot{q}	[W/m ²]	Wärmestromdichte
-----------	---------------------	------------------

Bei der stationären Berechnung der Wärmeübertragung nach den gängigen Normen zur Energiebedarfsberechnung von Gebäuden reicht eine charakteristische Materialgröße zur Berechnung der Wärmeleitung aus. Dies ist die Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]. Sie gibt die Wärmemenge an, die je Zeiteinheit durch 1 m² eines 1 m dicken homogenen Materials bei einer Temperaturdifferenz von 1 K zwischen seinen beiden planparallelen Oberflächen fließt. Je niedriger die Wärmeleitfähigkeit, umso besser die Dämmwirkung des Materials. Neben den inhärenten stofflichen Eigenschaften des Materials wird die Wärmeleitfähigkeit maßgeblich beeinflusst durch die folgend beschriebenen Einflussgrößen.

Einfluss der Temperatur eines Materials auf seine Wärmeleitfähigkeit

Der Einfluss der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit ist bei großen Temperaturschwankungen wie Brandereignissen zu berücksichtigen. Im bauphysikalisch relevanten Temperaturbereich und auch in dem Arbeitstemperaturbereich der thermisch aktivierten Massivholzelemente, beträgt die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit quer zur Faser 0,175 %/K (Suleiman et al. 1999). Durch die verhältnismäßig geringen Temperaturänderungen und den daraus resultierenden geringen Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit wird der Einfluss der Temperatur im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter diskutiert.

Einfluss der Rohdichte eines Materials auf seine Wärmeleitfähigkeit

Poröse Baustoffe wie Holz enthalten mehr oder weniger viele und große Lufträume im Gefüge. Je poröser der Stoff ist, desto geringer ist seine Rohdichte und umso größer ist das Volumen der im Gefüge eingeschlossenen Luft. Da Luft eine sehr viel niedrigere Wärmeleitfähigkeit besitzt als die festen Bestandteile des Materials, korreliert die Wärmeleitfähigkeit positiv mit der Rohdichte. Die Wärmeleitfähigkeit des realen Stoffes liegt somit zwischen der Wärmeleitfähigkeit von Luft und der Wärmeleitfähigkeit der festen Bestandteile des Materials. Bei Versuchen an Massivholzplatten fand (Bader 2005) heraus, dass bei einer Holzfeuchte von 12 % und einer Temperatur von 20 °C die Wärmeleitfähigkeit mit 0,0085 W/mK je 100 kg Dichteunterschied zunimmt.

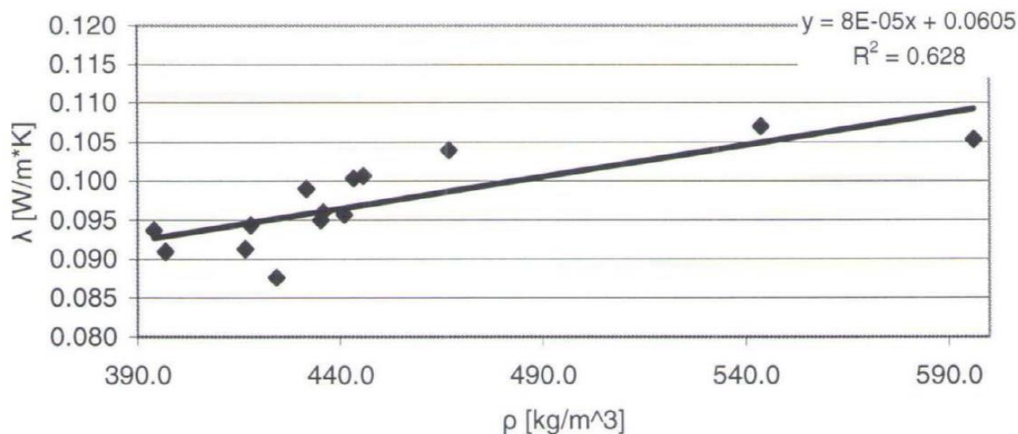


Abbildung 2.20: Wärmeleitfähigkeit von Massivholzplatten aus Nadelholz bei einer Holzfeuchte von $u = 12\%$ und einer Temperatur von 20 °C; aus: (Bader 2005)

Baders Ergebnisse entsprechen einer Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,36 % je 1 % steigender Rohdichte.

Andere Autoren weisen diesem Effekt eine deutlich stärkere Wirkung zu. So maß (Vollenschaar 2004) den Einfluss der Rohdichte auf die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Faserrichtung.

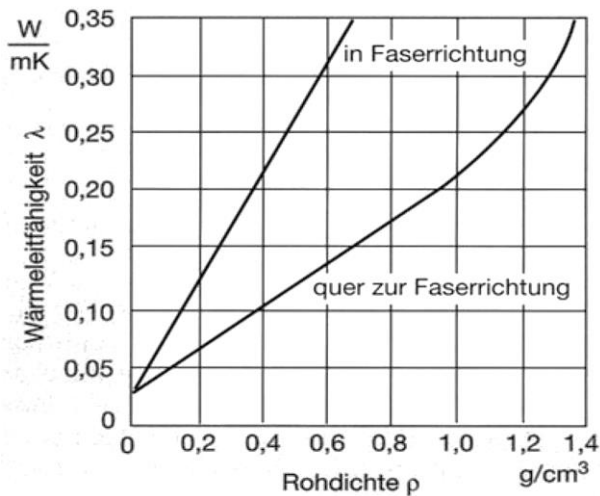


Abbildung 2.21: Wärmeleitfähigkeit über der Rohdichte in Abhängigkeit der Faserrichtung im Nadelholz bei einer Holzfeuchte von $u = 10\%$ und einer Temperatur von 20 °C ; aus: (Vollenschaar 2004)

Nach (Vollenschaar 2004) kann eine Erhöhung der Dichte um 20 % eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von bis zu 15 % bewirken. Das entspricht einer Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,75 % je 1 % steigender Rohdichte, mehr als das Doppelte des von Bader postulierten Wertes. Beim Werkstoff Holz sind überdies weitere Einflussgrößen zu berücksichtigen, die auf die Anisotropie des Werkstoffs zurückzuführen sind. Für die in dieser Arbeit verwendeten Brettsperrholzprodukte wurden, wie im nachfolgenden Abschnitt beschrieben, eigens Vorversuche an Materialproben des Ausgangsmaterials durchgeführt. So konnte die Wärmeleitfähigkeit bei der vorliegenden Rohdichte der prototypischen Versuchskörper exakt bestimmt werden. Für die weiterführenden Untersuchungen sollten entsprechend der Rohdichten der verwendeten Materialien die Wärmeleitfähigkeiten gemessen oder mit den obigen Abhängigkeiten bestimmt werden.

Einfluss der Faserrichtung auf die Wärmeleitfähigkeit

Insbesondere in diesem Zusammenhang ist die Jahresringlage zu beachten, deren Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit nach (Foglia et al. 2006) wie folgt am Beispiel von dreischichtigen Massivholzplatten aus Fichtenholz gemessen wurde. Dabei ergeben sich um 8 – 10 % niedrigere Werte in tangentialer Richtung als in radialer Faserrichtung. Signifikante Unterschiede dazu bringt die Messung des Wärmeflusses in axialer Faserrichtung. Bei Fichtenholz im darrtrockenen Zustand haben Schneider und Engelhardt bereits 1977 eine um 2,8 – 3,1-mal so hohe Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung gemessen als quer zur Faser (Schneider/Engelhardt 1977). Diese Eigenschaft kann damit erklärt werden, dass der Wärmeübergang in Längsrichtung zum einen geradliniger durch das Holzgefüge geschieht, es müssen weniger Lufträume um- und durchflossen werden, und zum anderen in axialer Richtung ein größerer Querschnitt der Zellwände zur Verfügung steht. Auf die Dämmwirkung einer Außenwand wirkt sich diese Eigenschaft in der Regel positiv aus, da das Holz hier quer zur Faser durchwärmt wird. Im Rahmen dieser Arbeit stellt die Anisotropie des Holzes aus gleichem Grund eine erhöhte Komplexität bei der numerischen Beschreibung der Wärmeausbreitung in den thermisch aktivierten Massivholzelementen dar.

Einfluss der Holzfeuchte auf die Wärmeleitfähigkeit

Ebenso bedeutend für die Praxis ist die Wirkung des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit. Bei steigendem Feuchtegehalt von porösen Stoffen verdrängt das Wasser die Luft aus den Poren. Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Materialfeuchte lässt sich nach Cammerer auf die ca. 25-fach höhere Wärmeleitfähigkeit von Wasser gegenüber der von Luft zurückführen (Cammerer 1970). Zusätzlich kann durch den Feuchtetransport im Material wie Diffusion, Kapillar- und Sorptionsvorgänge, zusätzlich Energie transportiert werden. In diesem Zusammenhang wird auf eine von Achziger und Cammerer erfolgte Zusammenstellung zur Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit verwiesen (Achtziger/Cammerer 1984). Daraus kann entnommen werden, dass die Wärmeleitfähigkeit von Fichte, Kiefer, Eiche und Buche im Bereich zwischen einem und zwei Prozent je Prozent Holzfeuchte zunimmt. Zur Berücksichtigung des Feuchteinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit wird in der DIN 52612-2 ein Zuschlag von 15 % auf die Wärmeleitfähigkeitswerte verlangt, welche bei 10 °C in trockenem Zustand an Holzwerkstoffplatten gemessen wurde. Nach (Foglia et al. 2006) entspricht dies einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von ca. einem Prozent je Prozent Wassergehalt (ebd.). Ähnlich groß wird dieser Einfluss auch für die Wärmeleitfähigkeit von Brettsperrholzprodukten vermutet.

Für eine exakte Bestimmung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit der in dieser Arbeit verwendeten Massivholzelemente wurden am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion eigens Labormessungen unternommen. Dabei wurden 15 Probekörper des Produktes Binderholz Brettsperrholz BBS125 aus Fichtenholz im Aufbau 5 x 20 mm in der Gesamtstärke von 100 mm bei unterschiedlichen Holzfeuchten gemessen (Binderholz GmbH 2019). Dabei handelt es sich um dasselbe Produkt, welches für die Prototypen der thermisch aktivierten Massivholzelemente verwendet wird. Die hier ermittelten Werte sind ein wichtiger Beitrag für die Datenbasis der in KAPITEL 5 beschriebenen numerischen Modellierung.

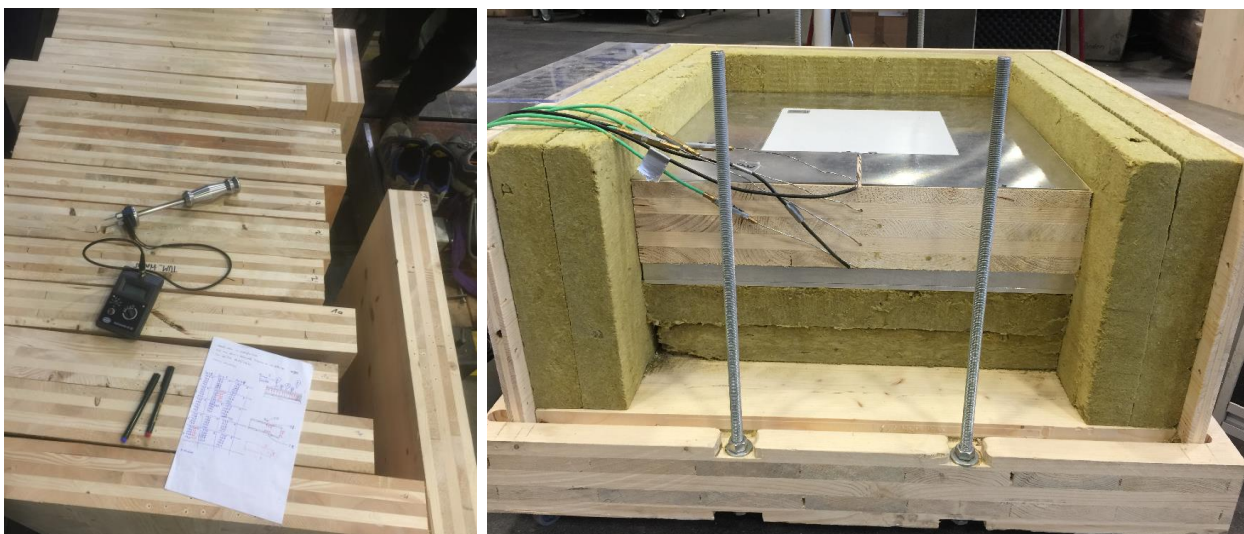


Abbildung 2.22: links: Brettsperrholzprobekörper und rechts: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

In Abbildung 2.22 sind links die 15 Brettsperrholzprobekörper und ein elektrisches Holzfeuchtemessgerät abgebildet. Die rechte Hälfte der Abbildung zeigt das eigens für die Versuchsreihe konstruierte Messgerät zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit. Dabei handelt es sich um ein Wärmeflussmessplattengerät, bei dem ein Probekörper zwischen zwei unterschiedlich warme Aluminiumplatten gespannt und die Wärmestromdichte in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz ermittelt wird. Je höher die Wärmeleitfähigkeit des Materials und je geringer dessen Plattendicke, desto größer die Wärmestromdichte. Eine ausführliche Beschreibung der Versuchskonfiguration kann Anhang A oder (Carstensen 2016) entnommen werden.

Die Konditionierung der Materialfeuchte erfolgte vorab beim Hersteller und wurde vor sowie nach der Messung der Wärmeleitfähigkeit in allen fünf Schichten durch das elektrische Widerstandsmessverfahren gemessen. Stichprobenartig wurden Kontrollmessungen der Holzfeuchte durch das Darrtrocknungsverfahren durchgeführt. Dabei ergab sich eine mittlere Abweichung zwischen den beiden Messverfahren von 1,05 % Holzfeuchte. Die 15 Probekörper wurden auf Materialfeuchten im Bereich $9\% < u < 18\%$ gebracht und dementsprechend in drei Serien gruppiert. Im Anschluss an die Messung wurden sämtliche Probekörper technisch bis auf annähernd 0 % Holzfeuchte getrocknet und die Trockenrohdichten bestimmt. Für die Probekörper der dritten Serien wurde im darrtrockenen Zustand erneut eine Messung der Wärmeleitfähigkeit durchgeführt. In Abbildung 2.23 sind die Ergebnisse aufgetragen.

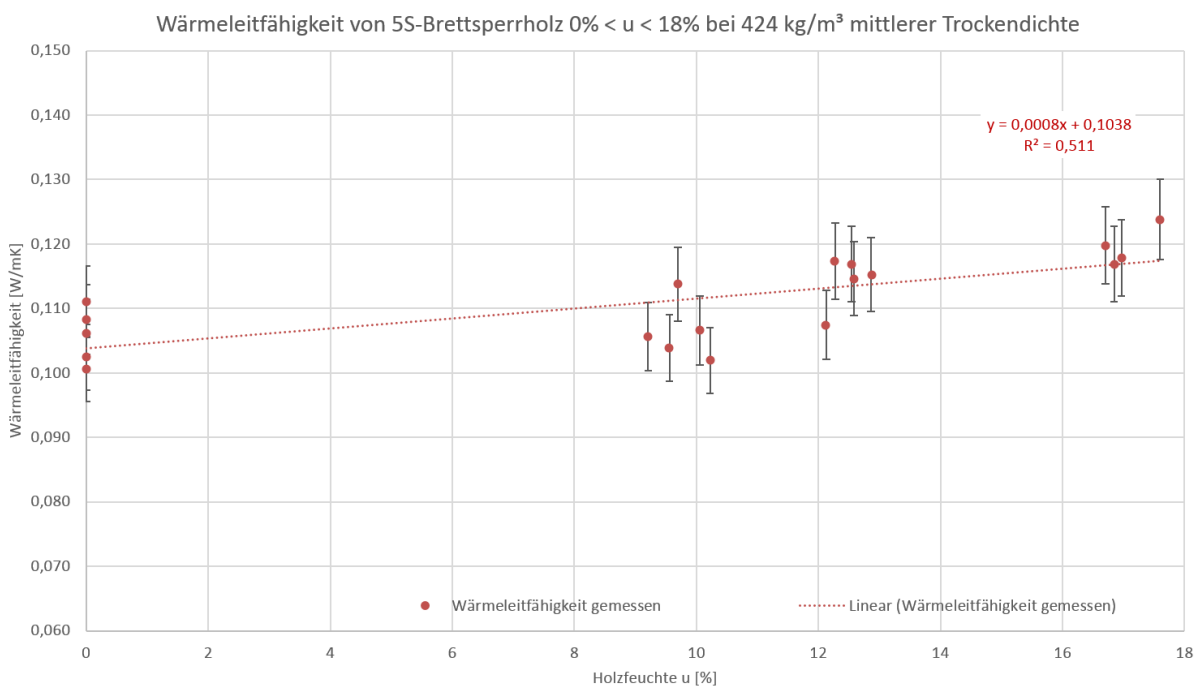


Abbildung 2.23: Gemessene Wärmeleitfähigkeiten der untersuchten Brettsperrholzelemente bei unterschiedlichen Materialfeuchten

Das Diagramm zeigt die gemessene Wärmeleitfähigkeit über der Holzfeuchte. Jeder Punkt im Diagramm entspricht einem Messversuch.

Für den baupraktisch relevanten Holzfeuchtebereich in beheizten Gebäuden von $5\% < u < 15\%$ ergeben sich Wärmeleitfähigkeiten zwischen $0,108 \text{ W/mK}$ und $0,116 \text{ W/mK}$. Für eine quantitative Angabe der Feuchteabhängigkeit wird eine lineare Regressionsgerade durch die Messpunkte der Wärmeleitfähigkeit über dem Holzfeuchtebereich $0\% < u < 18\%$ gelegt. Bei einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,511$ ergibt sich eine lineare Regression zu:

$$\lambda_{Fichte,\perp} = 0,0008 u + 0,1038 \quad [\text{W/mK}] \quad (2-11)$$

$\lambda_{Fichte,\perp}$	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit für Fichtenholz in radialer Richtung
--------------------------	--------	---

Die Ungenauigkeit der Ergebnisse wird mit fünf Prozent des Messwertes angegeben.

In diesem Kapitel wurden die Einflüsse auf die Wärmeleitung innerhalb des festen Materials in einem Bauteil beschrieben. In dem folgenden Kapitel soll die Wärmeübertragung durch Konvektion an der Bauteilgrenze und innerhalb des angrenzenden Fluids beschrieben werden.

2.4.4 Konvektion

Die Konvektion bezeichnet den durch ein strömendes Fluid übertragenden Wärmestrom zwischen zwei Systemen. Es werden zwei Arten der Konvektion unterschieden – freie Konvektion und erzwungene Konvektion. Diese unterscheiden sich nach der antreibenden Kraft. Erzwungene Konvektion liegt vor, wenn der Strömungsvorgang durch eine äußere Kraft, etwa den Einsatz einer Pumpe oder ein von außen aufgeprägtes Druckfeld, erfolgt. Erzwungene Konvektion findet vor allem in Rohrleitungen, in Kanälen oder an von außen aktiv umströmten Oberflächen statt. Dem gegenüber steht die natürliche Konvektion, deren Antrieb Dichtegradienten aufgrund von Temperatur- oder Konzentrationsgradienten sind. Im Bauwesen allgemein und in dieser Arbeit im Speziellen ist der konvektive Wärmeübergang zwischen einem festen Bauteil und der umgebenden strömenden Luft von großer Bedeutung. Hier wird zunächst auf die sensible Wärmeübertragung ohne Phasenübergang eingegangen. Die Menge der konvektiv übertragenen Wärme hängt dabei von der Strömungsgeschwindigkeit und der Wärmekapazität des Fluids, den Temperaturen der beiden beteiligten Stoffe (Bauteil und Luft), sowie von Neigung, Geometrie und Beschaffenheit der Oberfläche ab. Die konvektiv übertragene Wärmestromdichte an einer Bauteiloberfläche kann mit folgender Formel beschrieben werden:

$$\dot{q}_k = \alpha_k \cdot (T_S - T_F) \quad [\text{J/s}], [\text{W}] \quad (2-12)$$

\dot{q}_k	[W/m ²]	Wärmestromdichte durch Konvektion
α_k	[W/m ² K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
T_S	[K], [°C]	Temperatur an der Oberfläche
T_F	[K], [°C]	Temperatur des strömenden Mediums

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient α_k hängt vom Geschwindigkeits- und Temperaturfeld in der oberflächennahen Grenzschicht des strömenden Fluids ab. Diesen exakt zu berechnen, ist sehr aufwendig und analytisch mitunter nicht möglich. In der Lehre der Wärmeübertragung wird dieser Vorgang stets anhand von empirischen Ähnlichkeitsmodellen beschrieben. So wurden dimensionslose Kennzahlen gebildet, mit denen empirische Erkenntnisse aus zahlreichen Experimenten für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten abgebildet werden können. Die konkrete Berechnung erfolgt dabei für diskrete Bereiche des Strömungsfeldes an der betrachteten Oberfläche, für die ein charakteristischer Mittelwert angegeben wird. Der Wärmeübergangskoeffizient kann mit Hilfe der nachstehenden empirischen Gleichung (2-13) berechnet werden.

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_F}{l} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2-13)$$

α_k	[W/m ² K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
Nu	[-]	Nußelt Zahl
λ_F	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des Fluids
l	[m]	charakteristische Länge des Strömungsfeldes

Während die Wärmeleitfähigkeit λ_F des Fluids und die charakteristische Länge l des Strömungsfeldes, wie später beschrieben, direkt ermittelt werden können, muss die Nußelt-Zahl Nu wiederum empirisch berechnet werden.

Die Nußelt-Zahl ist das Verhältnis der für die Strömung charakteristischen Länge l und der Dicke der Temperaturgrenzschicht d . Die Strömungscharakteristik kann, wie zuvor beschrieben, frei oder erzwungen sein und in diesen Kategorien stark unterschiedliche Formen annehmen. Daher muss für die Berechnung der Nußelt-Zahl zunächst die der realen Situation ähnlichste Berechnungsformel ermittelt werden. Nachfolgend geschieht dies separat für freie und für erzwungene Konvektion.

Freie Konvektion an der Oberfläche der thermisch aktivierten Massivholzelemente:

Bei der freien Konvektion ist die Nußelt-Zahl und damit auch der Wärmeübergangskoeffizient abhängig vom Verhältnis der auf das Fluid wirkenden Auftriebskraft zur hemmenden Zähigkeitskraft (Grashof-Zahl) und dem Verhältnis der kinematischen Zähigkeit zur Temperaturleitfähigkeit (Prandtl-Zahl). Für die Bestimmung der Nußelt-Zahl sind zuvor die folgenden Kennzahlen zu bestimmen:

Die Grashof-Zahl beschreibt das Verhältnis der auf das Fluid wirkenden Auftriebskraft zur hemmenden Zähigkeitskraft.

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_F)}{\nu^2} \quad [-] \quad (2-14)$$

$$\beta = \frac{1}{T_F} \quad [1/K] \quad (2-15)$$

Gr	[-]	Grashof-Zahl
g	[-]	Erdbeschleunigung
l	[W/mK]	charakteristische Länge des Strömungsfeldes
β	[1/K]	Ausdehnungskoeffizient
T_s	[K], [°C]	Temperatur der Oberfläche
T_F	[K], [°C]	Temperatur des strömenden Mediums
ν	[m ² /s]	Kinematische Zähigkeit des Fluids
T_F	[K]	Absolute Fluidtemperatur

Die Prandtl-Zahl beschreibt das Verhältnis der kinematischen Zähigkeit zur Temperaturleitfähigkeit. Sie wird bei Gasen konstant mit 0,72 angenommen und berechnet sich bei Flüssigkeiten wie folgt:

$$Pr = \frac{\rho \cdot \nu \cdot c_p}{\lambda} \quad [-] \quad (2-16)$$

Pr	[-]	Prandtl-Zahl
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ν	[m ² /s]	Kinematische Zähigkeit des Fluids
c_p	[J/kg]	Isobare spezifische Wärmekapazität des Fluids
λ_F	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des Fluids

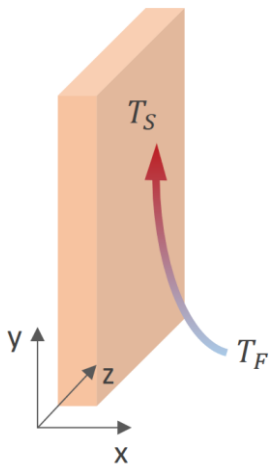
Die Rayleigh-Zahl beschreibt den Charakter der freien konvektiven Wärmeübertragung in einem Fluid. Sie ist das Produkt aus Grashof- und Prandtl-Zahl. Ihr Betrag gibt an, ob die Wärmeübertragung primär durch Wärmeleitung (niedriger Wert) oder durch Konvektion (hoher Wert) bestimmt ist.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad [-] \quad (2-17)$$

Ra	[-]	Rayleigh-Zahl
Gr	[-]	Graßhof-Zahl
Pr	[-]	Prandtl-Zahl

Mit der Rayleigh-Zahl kann der Wärmeübergang von der Oberfläche auf das Fluid charakterisiert und eine entsprechende Berechnungsformel für die Nußelt-Zahl bestimmt werden.

Für den Fall eines freien konvektiven Wärmeübergangs an einer vertikalen Platte, was für die in dieser Arbeit untersuchten thermisch aktivierten Massivholzelemente zutrifft, gilt für das Intervall $10^{-1} < Ra < 10^{12}$ der folgende Zusammenhang:



$$Nu = (0,825 + 0,387 \cdot [Ra \cdot f_1(Pr)]^{\frac{1}{6}})^2 \quad [-] \quad (2-18)$$

$$f_1(Pr) = [1 + \frac{0,492}{Pr}^{\frac{9}{16}}]^{\frac{-16}{9}} \quad [-] \quad (2-19)$$

Nu	[-]	Nußelt Zahl
Ra	[-]	Rayleigh-Zahl
Pr	[-]	Prandtl-Zahl
T_S	[K], [°C]	Temperatur der Oberfläche
T_F	[K], [°C]	Temperatur des strömenden Mediums

Die charakteristische Länge l des Strömungsfeldes entspricht in diesem Fall der thermisch aktivierten Plattenhöhe. Die mittlere Wärmestromdichte aus der Elementfläche an die Raumluft kann nun mit den oben beschriebenen Gleichungen im stationären Zustand beschrieben werden. Dieser Zusammenhang lässt sich analog für den Kühlfall anwenden.

Werden die thermisch aktivierten Massivholzelemente als Decken- oder Fußbodenheizung bzw. -Kühlung eingesetzt, sind die entsprechenden Ähnlichkeitsmodelle für horizontale Heiz- und Kühlplatten bei freier Konvektion anzuwenden. Dabei sind die Fälle Wärmestrom aufwärts und Wärmestrom abwärts zu unterscheiden.

Für den Fall, dass die Elemente einem raumseitigen starken Strömungsfeld ausgesetzt sind, sollen die Modelle der erzwungenen Konvektion angewendet werden. Im folgenden Abschnitt wird auf die Thematik der erzwungenen Konvektion eingegangen, um sich einem Verständnis der Wärmeübertragung vom Systemluftkreislauf im Inneren der thermisch aktivierten Massivholzelemente auf das Holzelement anzunähern.

Mischkonvektion an der Oberfläche der thermisch aktivierten Massivholzelemente

In einem realen Raum tritt an dessen Oberflächen regelmäßig nicht nur freie Konvektion auf. Beispielsweise bewirkt der Kaltluftfall an einem gekippten Fenster eine Luftströmung, welche die freie Konvektion an einer angrenzenden thermisch aktiven Oberfläche überlagern kann. In diesem Fall ist die Ähnlichkeit des Strömungsfeldes zu dem der oben genannten Berechnungsformel zugrundeliegenden Laborversuch nicht mehr gegeben. Die empirischen Ähnlichkeitskennzahlen dürfen in Folge nicht mehr ohne weiteres angewendet werden. Zur Lösung dieses Problems lieferte Churchill folgende Beziehung zur Berücksichtigung der Überlagerung von freier und erzwungener Konvektion:

$$Nu = \sqrt[3]{Nu_{erzwungen}^3 + Nu_{frei}^3} \quad [-] \quad (2-20)$$

Nu	[-]	Nußelt-Zahl für das überlagerte Strömungsfeld
$Nu_{erzwungen}$	[-]	Nußelt-Zahl für die erzwungene Konvektion
Nu_{frei}	[-]	Nußelt-Zahl für die freie Konvektion

Die Gleichung nach CHURCHILL gilt für den Fall, dass erzwungene Strömung und der thermische Auftrieb gleichgerichtet sind. Für den umgekehrten Fall ist das ‚Pluszeichen‘ zwischen den Radikanden gegen ein ‚Minuszeichen‘ auszutauschen (Glück 2008). Auf die Berechnung des Wärmeübergangs durch erzwungene Konvektion wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Erzwungene Konvektion in den Systemluftkanälen der thermisch aktivierten Massivholzelemente:

Innerhalb von haustechnischen Anlagen ist die erzwungene Konvektion die am häufigsten vorkommende konvektive Wärmeübertragungsart. Generell wird dabei Wärme über ein Fluid über lange Distanzen durch ein Gebäude transportiert. Der Wärmeübertrag vom Fluid auf das Bauteil wird durch das Temperaturgefälle zwischen dem strömenden Fluid und der angrenzenden Wandung sowie durch die Charakteristik der Strömung bestimmt. Die Strömung wird wiederum durch ein äußeres Druckfeld, etwa durch eine Pumpe oder ein Gebläse, aufrechterhalten. Die Intensität der erzwungenen Strömung kann deutlich größer werden als bei der freien Konvektion. Bei mäßigen Geschwindigkeiten und langen, geraden und hindernisfreien Strömungswegen bildet die Strömung, wie in Abbildung 2.24 links gezeigt, ein parabelförmiges Geschwindigkeitsprofil im Kanalquerschnitt aus. Diese Strömungsform wird als laminare Strömung bezeichnet. Übersteigt die Strömungsgeschwindigkeit einen bestimmten Wert oder müssen Umlenkungen im Strömungsweg umströmt werden, entstehen Wirbel quer zur Hauptströmungsrichtung. Die Strömung wird turbulent. Der Turbulenzgrad einer Strömung wird zudem durch die Fließfähigkeit bzw. die Viskosität des Fluids bestimmt. Je zäher ein Fluid ist, desto länger bleibt die Strömungscharakteristik laminar.

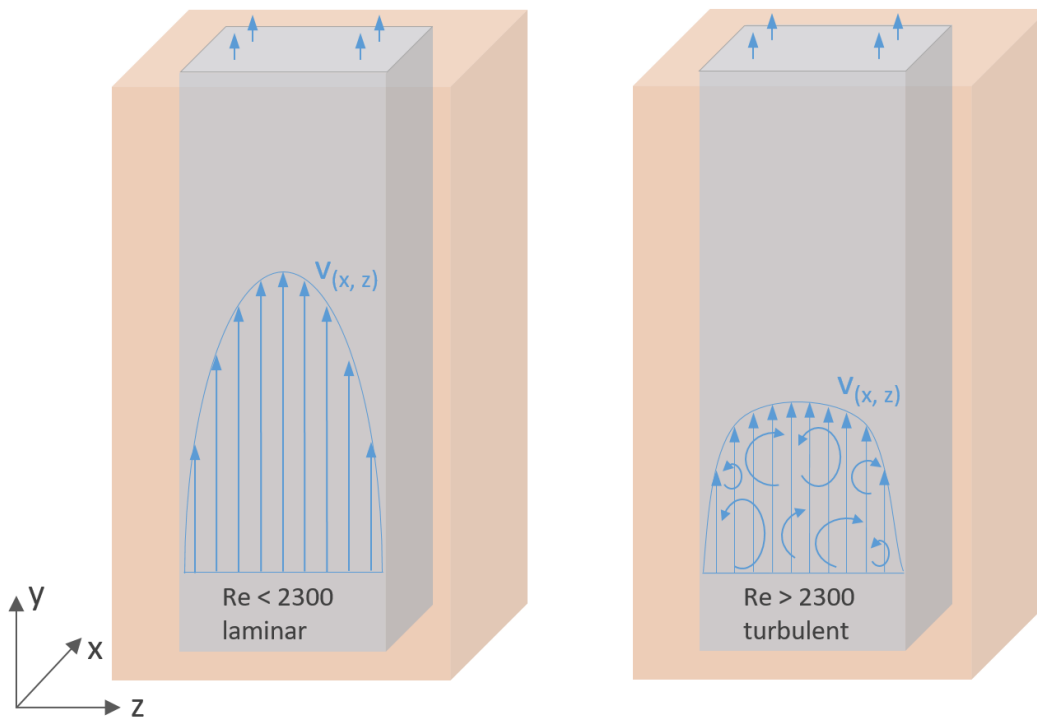


Abbildung 2.24: Geschwindigkeitsprofil der erzwungenen Kanalströmung; links: laminar und rechts: turbulent

Für die Wärmeübertragung vom Fluid auf die Kanalwandung ist die turbulente Strömungsform vorteilhaft, da die querströmenden Wirbel eine effektive konvektive Wärmeübertragung vom Kernstrahl in die äußeren Bereiche gewährleisten. Zudem wird kinetische Energie vom Kern der Strömung in den Bereich an der Kanalwand übertragen, welche die isolierende Wandgrenzschicht durchmischt und dadurch abbaut. So wird ein effektiverer Wärmeübergang vom Fluid auf die Kanalwand geschaffen. Allerdings gehen mit den Querwirbeln höhere Reibungsverluste einher. Daher muss für das Aufrechterhalten einer turbulenten Strömung im Kanal eine höhere äußere hydraulische Energie durch das Gebläse aufgewendet werden.

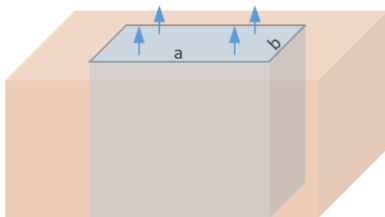
Zur Berechnung des Wärmeübergangs vom Fluid auf die Wandung des Kanals sind die beiden Fälle laminare Strömung und turbulente Strömung zu unterscheiden. Analog zum Vorgehen bei der freien Konvektion werden auch bei der Berechnung der konvektiven Wärmeübertragung Ähnlichkeitsmodelle verwendet, welche für den konkreten Fall bestimmt werden müssen. Für die eindeutige Zuordnung des Turbulenzgrades reibungsbehafteter Strömungsvorgänge wird die Reynolds-Zahl Re eingeführt. Diese beschreibt das Verhältnis von Trägheitskräften zu Reibungskräften und ist maßgebend bei der Wahl eines zutreffenden Ähnlichkeitsmodells für den Wärmeübergang. Die Reynolds-Zahl lässt sich aus der mittleren Geschwindigkeit des strömenden Fluids v , dessen kinematischer Zähigkeit ν und der räumlichen Größe der Strömungssituation d_h berechnen.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_h}{\eta} = \frac{v \cdot d_h}{\nu} \quad \text{mit} \quad \nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [-], [\text{m}^2/\text{s}] \quad (2-21), (2-22)$$

Re	[-]	Reynolds-Zahl der Strömung
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Fluids
v	[m/s]	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit
ν	[m ² /s]	Kinematische Zähigkeit
η	[Pa s]	Dynamische Zähigkeit
d_h	[m]	Charakteristische Länge (hydraulischer Durchmesser)

Bei $Re < 2300$ liegt im Fall von durchströmten Rohren und Kanälen eine laminare Strömung vor. Übersteigt die Reynolds-Zahl einen kritischen Wert von $Re_{krit} = 2300$, kann sich eine turbulente Strömung ausbilden.

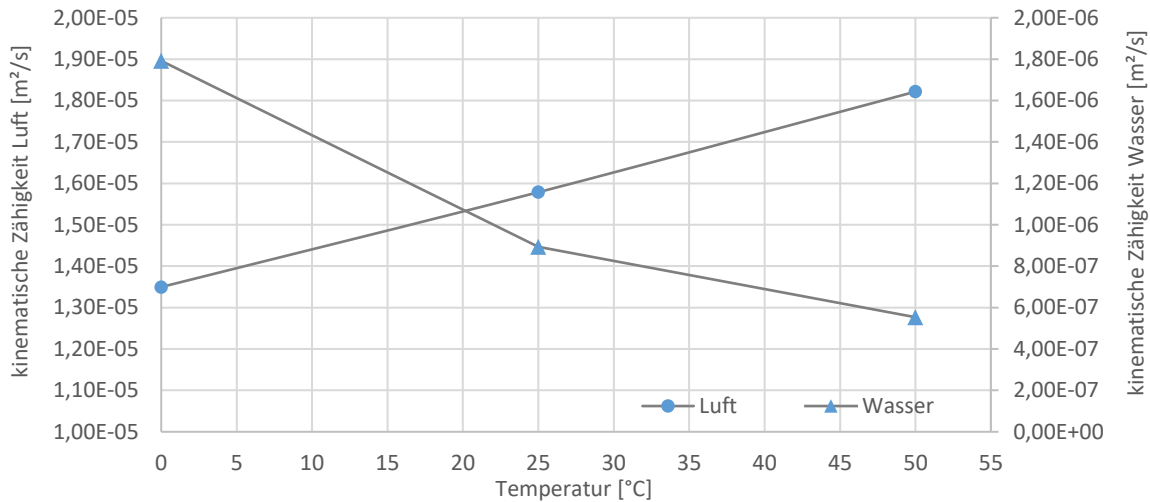
Die Größe der Strömungssituation wird angegeben als charakteristische Länge. Diese entspricht beispielsweise bei Rohren dem Innendurchmesser. Bei rechteckigen Kanälen wird sie definiert als Quotient aus der vierfachen Strömungsquerschnittfläche A und dem benetzten Umfang U (Albers/Recknagel/Sprenger 2017) Für rechteckige Luftkanäle gilt:



$$d_h = \frac{4 \cdot A}{U} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} \quad [\text{m}] \quad (2-23)$$

Die kinematische Zähigkeit der Fluide Wasser und Luft wird im VDI Wärmeatlas mit den folgenden Werten angegeben:

Tabelle 2-4: Kinematische Zähigkeit ν [m^2/s] bei 1 bar; aus: (Kabelac 2006)



Für eine Temperatur von 25 °C und einem Druck von einem bar ergeben sich für:

$$\nu_{Luft,25^{\circ}C} = 157,87 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \quad \nu_{Wasser,25^{\circ}C} = 8,93 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

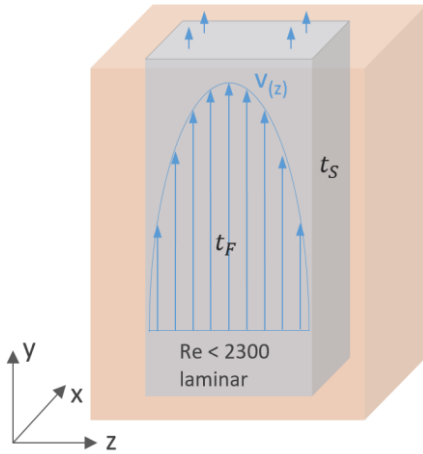
Im folgenden Schritt soll vorgehend auf die konkrete Geometrie der im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Prototypen thermisch aktivierter Massivholzelemente eingegangen werden, um eine erste Einschätzung der Strömungscharakteristik zu ermöglichen. Dafür wird zunächst der hydraulische Durchmesser der Luftkanäle entsprechend der Formel (2-24) berechnet.

$$d_h = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} = \frac{2 \cdot 0,04 \cdot 0,02}{0,04 + 0,02} = 0,02\overline{6} \text{ m} \quad (2-24)$$

Von Interesse ist nun die kritische Strömungsgeschwindigkeit, bei der die Strömung in den ungestörten Kanälen turbulent werden kann. Durch Umstellen der Gleichung (2-21) nach v_{kritt} erhält man die kritische Strömungsgeschwindigkeit, ab der die laminare Schichtung der Strömung nicht mehr stabil ist und die Strömung turbulent wird:

$$v_{kritt} = \frac{Re_{kritt} \cdot \nu}{d_h} = \frac{2300 \cdot 157,87 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}}{0,02\overline{6} \text{ m}} = 1,38 \text{ m/s} \quad (2-25)$$

Die Berechnung zeigt, dass ein laminares Strömungsprofil in den thermisch aktivierten Massivholzelementen in den geraden ungestörten Kanälen bis zu einer Geschwindigkeit von 1,38 m/s stabil bzw. möglich ist. Für die Berechnung des erzwungenen konvektiven Wärmeübergangs müssen demnach die Ähnlichkeitsmodelle für den laminaren und für den turbulenten Strömungsbereich in Betracht gezogen werden. In den folgenden Abbildungen sind für die beiden Reynolds-Zahlenbereiche laminar und turbulent die einschlägigen Berechnungsformeln für die Nußelt-Zahl und damit für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizient α_k aufgeführt. Bei deren Anwendung ist stets auf den nebenstehenden Gültigkeitsbereich zu achten.

Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient bei laminarer Strömung in geraden Kanälen ($Re < 2300$)


$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_F}{d_h} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2-26)$$

$$Nu = (49,028 + 4,173 \cdot Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{L})^{0,333} \quad [-] \quad (2-27)$$

Gültigkeitsbereich:

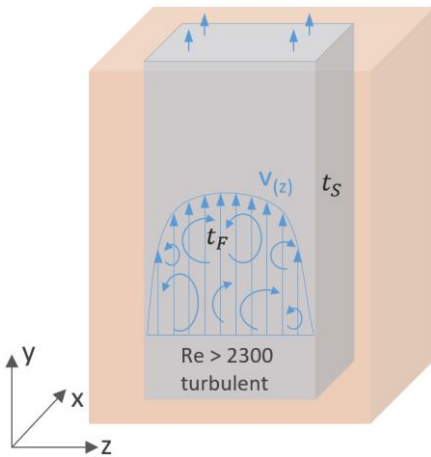
$Re < 2320$;

$$0,1 < \left(\frac{Re \cdot Pr \cdot d_h}{L} \right) < 10^4$$

α_k	[W/m ² K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
Nu	[-]	Nußelt-Zahl
λ_F	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des Fluids
d_h	[m]	Charakteristische Länge (hydraulischer Durchmesser)
Re	[-]	Reynolds-Zahl der Strömung
Pr	[-]	Prandtl-Zahl
L	[m]	Länge des betrachteten Kanalelements in Y-Richtung
t_S	[K], [°C]	Temperatur der Kanaloberfläche
t_F	[K], [°C]	Temperatur des strömenden Mediums

Es muss erwähnt werden, dass eine laminare Strömung auch dann mit Turbulenzen durchsetzt ist, wenn geometrische Unregelmäßigkeiten im Strömungskanal vorhanden sind. Diese exakt zu beschreiben ist ausgesprochen schwierig. Zweckmäßig ist es daher, bei stark verwinkelten Strömungstrecken auf eine numerische Simulation mit ausreichender räumlicher Auflösung auszuweichen.

Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient bei turbulenter Strömung in geraden Kanälen ($Re > 2300$)



$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_F}{d_h} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

$$Nu = \frac{B(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7 \cdot B^{0,5} \cdot (Pr^{0,667} - 1)} \cdot K_L \quad [-] \quad (2-28)$$

$$K_L = \left[1 + \left(\frac{d_h}{L}\right)\right]^{0,667} \quad [-] \quad (2-29)$$

$$B = \frac{1}{(5,15 \lg(Re) - 4,64)^2} \quad [-] \quad (2-30)$$

Gültigkeitsbereich:

$$2320 < Re < 10^4;$$

$$\left(\frac{d_h}{L}\right) < 1$$

α_k	[W/m ² K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
Nu	[-]	Nußelt Zahl
λ_F	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des Fluids
d_h	[m]	Charakteristische Länge (hydraulischer Durchmesser)
Re	[-]	Reynolds-Zahl der Strömung
Pr	[-]	Prandtl-Zahl,
L	[m]	Länge des betrachteten Kanalelements in Y-Richtung
t_s	[K], [°C]	Temperatur der Kanaloberfläche
t_F	[K], [°C]	Temperatur des strömenden Mediums

Real erfolgt der Umschlag von laminarer Strömung zu turbulenter Strömung nicht bei einer fest definierten Reynolds-Zahl. Nach Gnielinski sollte die Nußelt-Zahl für $Re = 2300$ ($\alpha_{k,laminar}$) und für $Re = 10^4$ ($\alpha_{k,turbulent}$) linear interpoliert werden (Albers/Recknagel/Sprenger 2017). Hierdurch kann bei dynamischen Berechnungen ein Wertesprung im Verlauf der Nußelt-Zahl als Funktion von Re vermieden werden.

2.4.5 Strahlung

Jeder Körper emittiert und absorbiert bei Temperaturen über dem absoluten Nullpunkt, $T > 0 \text{ K}$ Energie durch Strahlung, wobei diese Prozesse bei undurchsichtigen Körpern auf deren Oberfläche konzentriert sind. Strahlung ist nicht an ein Trägermedium gebunden und breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Wärmestrahlung ist elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich $0,1 \mu\text{m} < \lambda < 1000 \mu\text{m}$. Je nach der Temperatur eines Körpers ergibt sich ein unterschiedliches Spektrum der von seiner Oberfläche emittierten Strahlung. Abbildung 2.25 zeigt die Planck'schen Ausstrahlungsspektren von Schwarzen Körpern für unterschiedliche Temperaturen. In der Theorie entspricht die von dem schwarzen Körper emittierte Strahlungsleistung dem Integral dieser temperatur- und wellenlängen-abhängigen Ausstrahlungsfunktion.

In der Abbildung sind die idealisierten Spektren der kurzwelligigen Solarstrahlung (gelb) und der aus der irdischen Umwelt entstammenden langwelligigen Wärmestrahlung (rot) hervorgehoben. Ferner kennzeichnet der regenbogenfarbige Bereich im Spektrum von ca.: $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,8 \mu\text{m}$ das für den Menschen visuell wahrnehmbare Licht. Unterhalb des sichtbaren Spektrums liegt das Spektrum der ultravioletten Strahlung (UV) und oberhalb der infraroten Strahlung (IR).

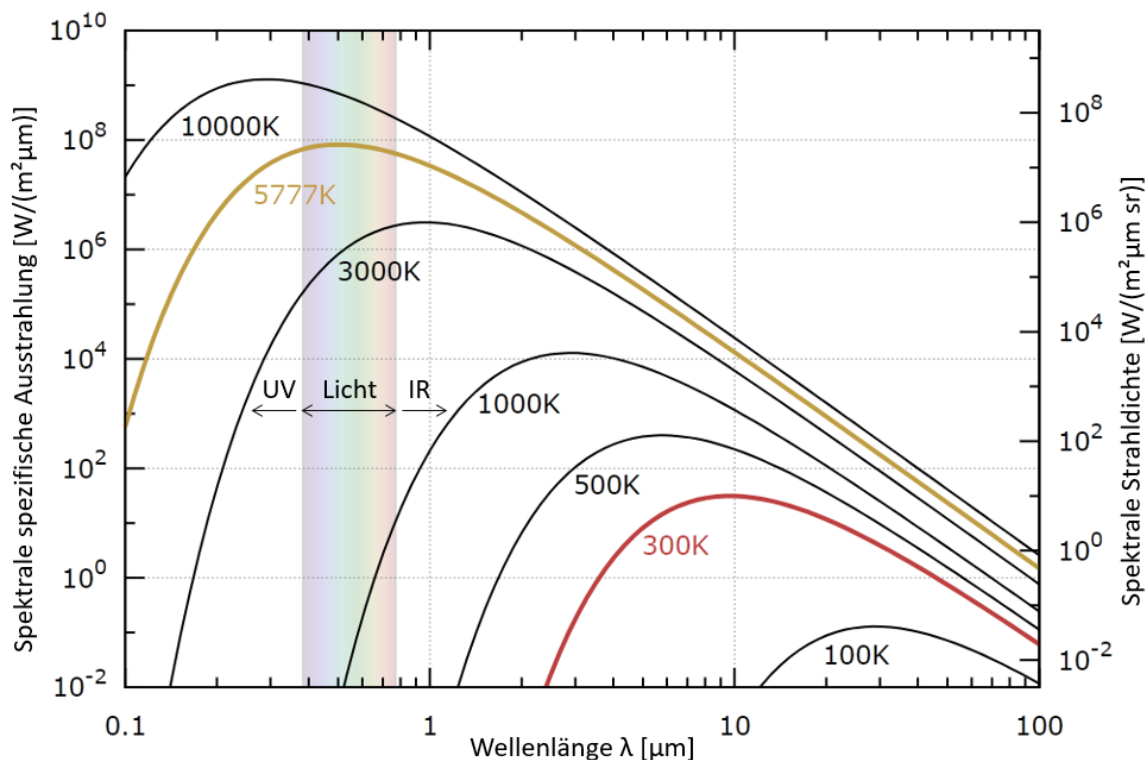


Abbildung 2.25: Spektrale, flächenspezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers bei unterschiedlichen Temperaturen; in Anlehnung an (Prog 2017)

Mit dem Konstrukt der idealen Schwarzkörperstrahlung lässt sich beschreiben, welche maximale Ausstrahlung ein Körper theoretisch emittieren kann. Die Strahlungsleistung ist proportional zur vierten Potenz der thermodynamischen Temperatur. So kann mit Hilfe von Gleichung (2-31) die maximale Wärmestromdichte berechnet werden, die von der Oberfläche eines Körpers als Wärmestrahlung ausgesendet werden kann.

$$\dot{q}_s = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (2-31)$$

\dot{q}_s	[W/m ²]	Radiative Wärmestromdichtung
σ	[5,67·10 ⁻⁸ W/(m ² K ⁴)]	Stefan-Boltzmann-Konstante
T	[K]	Thermodynamische Temperatur

Dabei ist σ eine universelle Proportionalitätskonstante, die sogenannte Stefan-Boltzmann-Konstante. Die radiative Wärmestromdichte des schwarzen Strahlers kann allerdings von realen Strahlern nicht erreicht werden. Die verminderte Strahlung eines realen Körpers wird mit Hilfe des Emissionsgrads ε berechnet. Dieser gibt das Verhältnis der Strahlung der realen Oberfläche zur Strahlung des schwarzen Strahlers an. Der Emissionsgrad des schwarzen Strahlers ist somit $\varepsilon = 1$, jener Emissionsgrad der reale Strahler respektive des grauen Strahlers immer $\varepsilon < 1$ (Albers/Recknagel/Sprenger 2017).

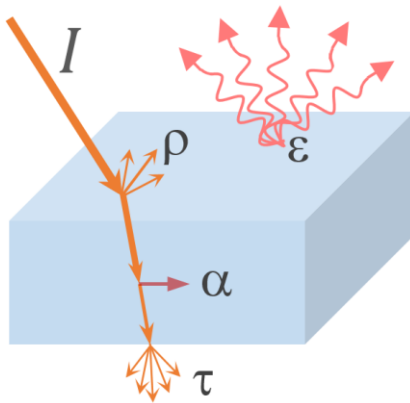
Mit dem in der folgenden Gleichung eingesetzten Emissionsgrad ergibt sich die von einem realen Körper emittierte Wärmestromdichte zu:

$$\dot{q}_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (2-32)$$

\dot{q}_s	[W/m ²]	Radiative Wärmestromdichtung
σ	[5,67·10 ⁻⁸ W/(m ² K ⁴)]	Stefan-Boltzmann-Konstante (Thermodynamische Naturkonstante)
T	[K]	Thermodynamische Temperatur
ε	[-]	Emissionsgrad der Oberfläche

Das Kirchhoff´sche Gesetz besagt, dass der Emissionsgrad ε einer Oberfläche bei gleicher Temperatur identisch ist mit seinem Absorptionsgrad α . In den meisten Baustoffdatenbanken sind daher lediglich die Emissionsgrade für das Material angegeben. Diese werden bei detaillierter Berechnung getrennt für kurzwellige Solarstrahlung und langwellige Wärmestrahlung angegeben.

Zur Veranschaulichung ist in dem folgenden Schema der radiative Wärmedurchgang durch ein transparentes Bauteil dargestellt. Beim Auftreffen der kurzwelligen Solarstrahlung I wird entsprechend des Reflexionsgrades ρ der Oberfläche ein Teil der Strahlung reflektiert. Weitere Reflexionen treten an sämtlichen Oberflächen auf (hier nicht dargestellt). Da reale Bauteile nicht vollständig diatherm (transparent) sind, wird ein weiterer Teil der Strahlung im Material entsprechend des Absorptionsgrades α absorbiert und in Wärme umgewandelt. Der übrigbleibende Teil entspricht dem Transmissionsgrad τ und wird schließlich transmittiert. Der vom Material absorbierte Teil der Strahlungsleistung führt zu einer Erwärmung des Körpers und in Folge zu einer sekundären Re- Emission an die Umgebung. Bei einer moderaten Temperatur der Oberfläche geschieht diese Abstrahlung ε im langwelligen Spektrum und ist deshalb geschlängelt dargestellt.



Gesamteinstrahlung (kurzwellig)	I	[W/m ²]
Reflektion	$\rho \cdot I$	[W/m ²]
Absorption	$\alpha \cdot I$	[W/m ²]
Transmission	$\tau \cdot I$	[W/m ²]
Es gilt:	$\rho + \alpha + \tau = 1$	[-]
Emissionsgrad (langwellig)	ε	[-]

Wieviel Wärme tatsächlich von einem Körper an seine Umgebung über Strahlung abgegeben wird, hängt vom gesamten Strahlungsaustausch seiner Oberfläche mit umliegenden Körpern ab. Wenn ein Körper im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung steht, also emittierte Strahlung und absorbierte Strahlung gleich groß sind, ist der bilanzielle Strahlungswärmestrom \dot{q}_s Null. Dieser kann mit Hilfe des radiativen Wärmeübergangskoeffizienten α_s und der Temperaturdifferenz zwischen der betrachteten Oberfläche und ihrer Umgebung berechnet werden. Der Wärmeübergangskoeffizient α_s der langwelligigen Strahlung berechnet sich nach (Baehr/Stephan 2013) zu:

$$\alpha_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_s^4 - T_u^4}{T_s - T_u} \quad [-] \quad (2-33)$$

Hieraus ergibt sich:

$$\dot{q}_s = \alpha_s \cdot (T_s - T_u) \quad [\text{W/m}^2] \quad (2-34)$$

α_s	[W/m ² K]	Radiativer Wärmeübergangskoeffizient
ε	[-]	Emissionsgrad der Oberfläche
σ	[5,67 · 10 ⁻⁸ W/(m ² K ⁴)]	Stefan-Boltzmann-Konstante
\dot{q}_s	[W/m ²]	Radiative Wärmestromdichtung
T_s	[K]	Thermodynamische Temperatur der betrachteten Oberfläche
T_u	[K]	Thermodynamische Temperatur der Umgebung

In dieser Schreibweise kann der Wärmeaustausch an einer Bauteiloberfläche aufgrund von Konvektion und langwelliger Strahlung durch die Kombination der Gleichungen (2-33) und (2-34) in der folgenden Form berechnet werden:

$$\dot{q} = (\alpha_s + \alpha_k) \cdot (T_s - T_u) \quad [\text{W/m}^2] \quad (2-35)$$

\dot{q}	[W/m ²]	Wärmestrom durch Konvektion und langwellige Strahlung
α_s	[W/m ² K]	radiativer Wärmeübergangskoeffizient
α_k	[W/m ² K]	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
T_s	[K]	Thermodynamische Temperatur der betrachteten Oberfläche
T_u	[K]	Thermodynamische Temperatur der Umgebung

Diese Formel eignet sich, um den gesamten Wärmestrom an einer Raumbofläche im eingeschwungenen Zustand und bei Kenntnis aller die Strömung beeinflussenden Größen zu beschreiben.

2.4.6 Gesamtwärmeübergangskoeffizient von thermisch aktiven Flächen gemäß Basiskennlinie

In den voranstehenden Kapiteln werden die physikalischen Grundlagen der Wärmeübertragung an Oberflächen durch Konvektion und Strahlung beschrieben. Die Erläuterungen werden stark auf die Anwendung von thermisch aktivierten Wandelementen ausgerichtet aber gleichzeitig weitgehend kausal und allgemeingültig gehalten. So beruhen die dort beschriebenen Berechnungsformeln auf direkten mathematischen Herleitungen von elementaren Grundgleichungen der Physik oder sind die formulierten Essenzen von wohldefinierten und reproduzierbaren ähnlichen Labormessungen. Dies setzt weitgehende Kenntnis der Berechnungsrandbedingungen voraus, die in der Praxis nur selten vollständig vorliegen. Die realen Größen der Wärmeübergangskoeffizienten α_s und α_k sind von vielen Einflussgrößen des realen Raumes abhängig. Einige wichtige Faktoren sind nach Glück die Raumgeometrie, die Möblierung, Art und Lage der thermisch aktivierten Flächen, der Aufbau der passiven Raumumfassung, Eigenschaften und Lage der transparenten Flächen sowie die Art der Raumlüftung und die Außentemperatur. Während bei Bestandsgebäuden mit niedrigem Dämmstandard der Wärmedurchgang durch die Außenbauteile dominierenden Einfluss auf die Leistung von thermoaktiven Oberflächen nahm, ist bei jenen nach aktuellem Standard gebauten Gebäuden die Art der Außenluftzufuhr bestimmend.

Für die baupraktische Berechnung zur Auslegung oder Optimierung eines Flächenheiz- und -kühlsystems sind in der Regel lediglich die mittlere Lufttemperatur T_L sowie die operative Raumtemperatur T_R bekannt, auf die das System ausgelegt wird. Die Auslegung erfolgt dabei mit der sogenannte Basiskennlinie α^* , die sich auf die operative Raumtemperatur T_R gründet. Die in diesem Zusammenhang am häufigsten verwendete Auslegungskennlinie ist die Basiskennlinie für die Bestimmung der Wärmeleistung und Auslegung von Fußbodenheizungen nach DIN EN 1264 Teil 2: 2013-3 und Teil 3: 2009-11.

Analog hierzu führte Glück einen Ansatz ein, der eine praxisgerechte Bestimmung der Gesamtwärmestromdichte von thermisch aktiven Raumumfassungen an den Raum ermöglicht. In der folgenden Tabelle 2-5 werden die Definitionsgleichungen gemäß Basiskennlinie für thermoaktive Bauteile in unterschiedlichen Raumpositionen und Wärmestromrichtungen dargestellt.

Tabelle 2-5: Wärmestromdichte gemäß Basiskennlinie für thermoaktive Bauteile in verschiedenen Einbaulagen und Wärmestromrichtungen nach (Glück 2008).

Gesamtwärmestromdichte gemäß Basiskennlinie \dot{q}^*

$$\dot{q}^* = \alpha^* \cdot (T_s - T_R) \approx \dot{q} = a \cdot (T_s - T_L) \quad \text{Gesamtwärmestromdichte bezogen auf die operative Raumtemperatur } T_R \quad (2-36)$$

Mit der Definitionsgleichung:

$$\alpha^* = a \cdot \frac{T_s - T_L}{T_s - T_R} \quad \text{Gesamtwärmeübergangskoeffizient } \alpha^* \text{ gemäß Basiskennlinie} \quad (2-37)$$

Gesamtwärmeübergangskoeffizient gemäß Basiskennlinie α^*

$$\alpha_{\text{vertikal,IW}}^* = 1,6 \cdot |T_s - T_R|^{0,3} + 6,12 \quad \text{Thermisch aktive Innenwand} \quad (2-38)$$

(h = 1,1 m; $g_{LT,10} = 3 \text{ K/m}$; $\delta_{t,10} = 2 \text{ K}$)

$$\alpha_{\text{vertikal,AW}}^* = 1,6 \cdot |T_s - T_R|^{0,3} + 5,1 \quad \text{Thermisch aktive Außenwand} \quad (2-39)$$

(h = 1,1 m; $g_{LT,10} = 3 \text{ K/m}$; $\delta_{t,10} = 0 \text{ K}$)

$$\alpha_{DH}^* = 0,18 \cdot |T_s - T_R|^{0,31} + 6,12 \quad \text{Deckenheizung (Wärmestrom abwärts)} \quad (2-40)$$

(h = 2,5 m; $g_{LT,10} = 4 \text{ K/m}$; $\delta_{t,10} = 2 \text{ K}$)

$$\alpha_{DK}^* = 2,76 \cdot |T_s - T_R|^{0,31} + 6,12 \quad \text{Deckenkühlung (Wärmestrom aufwärts)} \quad (2-41)$$

(h = 2,5 m; $g_{LT,10} = 2 \text{ K/m}$; $\delta_{t,10} = 2 \text{ K}$)

$$\alpha_{FBH}^* = 2,60 \cdot |T_s - T_R|^{0,31} + 6,12 \quad \text{Fußbodenheizung (Wärmestrom aufwärts)} \quad (2-42)$$

(h = 0,0 m; $g_{LT,10} = 2 \text{ K/m}$; $\delta_{t,10} = 2 \text{ K}$)

$$\alpha_{FBK}^* = 0,25 \cdot |T_s - T_R|^{0,31} + 6,12 \quad \text{Fußbodenkühlung (Wärmestrom abwärts)} \quad (2-43)$$

(h = 0,0 m; $g_{LT,10} = 4 \text{ K/m}$; $\delta_{t,10} = 2 \text{ K}$)

T_s	°C	Temperatur der Bauteiloberfläche
T_L	°C	Lufttemperatur in der unbeeinflussten Umgebung der Bauteiloberfläche
T_R	°C	Operative Temperatur
a	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient (gesamt)
α^*	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient gemäß Basiskennlinie (Bezug auf T_R)
\dot{q}	W/m ²	Wärmestromdichte
\dot{q}^*	W/m ²	Basiskennlinie (Bezug auf T_R)
h	m	Bezugshöhe auf die Fußbodenoberkante am aktivierten Bauteil
$g_{LT,10}$	K/m	vertikaler Lufttemperaturgradient bezogen auf: $ T - T_R = 10 \text{ K}$
$\delta_{t,10}$	K	Korrektur der Strahlungsumgebungstemperatur zu T_R bezogen auf: $ T - T_R = 10 \text{ K}$

In Abbildung 2.26 sind die zuvor beschriebenen Gleichungen dargestellt.

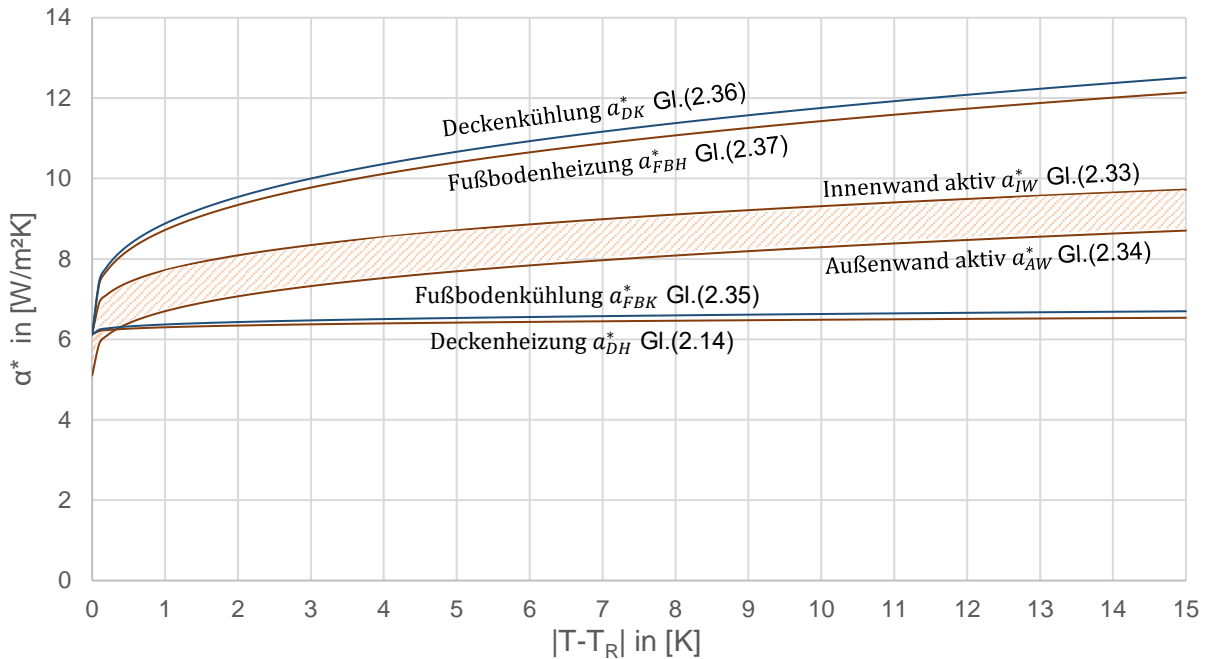


Abbildung 2.26: Basiskennlinien für Wärmeübergangskoeffizienten α^* von thermoaktiven Bauteilen

Auf der Ordinate sind die der Gesamtwärmeübergangskoeffizienten α^* als Funktion der Temperaturdifferenz $|T - T_R|$ dargestellt. Dabei ist T die Temperatur der thermisch aktiven Oberfläche und T_R die operative Raumtemperatur. Es zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen ausgerichteten Heiz- und Kühlflächen. Die niedrigsten thermischen Leistungen sind bei waagerechten Bauteilen mit abwärts gerichtetem Wärmestrom zu erwarten. Dies trifft zu bei Fußbodenkühlungen und Deckenheizungen und kann mit dem konvektiven Teil des Wärmeübergangs begründet werden. Warme Luft steigt auf und wirkt isolierend unter einer Deckenheizung. Analog verhält sich kühle Luft über einer Fußbodenkühlung. Zudem resultieren aus den Betriebszuständen ‚heizen von oben‘ und ‚kühlen von unten‘ mit $g_{LT,10} = 4 \text{ K/m}$ die größten vertikalen Lufttemperaturgradienten, was sich negativ auf die thermische Behaglichkeit auswirkt. Diese Thematik wird tiefergehend in Abschnitt 2.6.2. diskutiert. Werden dagegen Fußböden zum Heizen und Decken zum Kühlen eingesetzt, können die höchsten spezifischen Leistungen erzielt werden. Thermoaktive Wandelemente eignen sich gleichermaßen zum Heizen als auch zum Kühlen. Im Heizbetrieb steigt die Luft vor den erwärmten Oberflächen auf, im Kühlfall sinkt sie ab und bei erzwungener Konvektion verhalten sich Heiz- und Kühlfall ebenfalls gleich. Unterschieden werden muss zwischen thermisch aktivierten Außen- und Innenwänden. Werden die thermisch aktivierten Flächen in Außenwandbauteilen integriert, wirken diese positiv auf die Wärme-physiologischen Bedingungen, da die Strahlungstemperatur-Asymmetrie im Raum geringer ist als bei aktivierten Innenwänden. Die thermische Leistung von thermoaktivierten Innenwänden ist aus demselben Grund etwas höher, da diese mit den tendenziell kälteren Außenwandflächen in Strahlungswechselwirkung stehen (Glück 2008).

2.4.7 Exkurs: Abgeleitete thermische Bewertungskennzahlen für instationäre Wärmeleitung

Real ändert sich die Temperatur in einem Bauteil nicht nur über den Ort, sondern es kommt zu ständigen zeitlichen Temperaturschwankungen im Bauteil, die durch äußere Aufheiz- bzw. Auskühlvorgänge hervorgerufen werden. Diese Art der Wärmeleitung - mit zeitabhängigem Wärmestrom - wird als instationär bezeichnet. Hier muss die zeitliche Änderung des Energiegehalts eines Stoffes berücksichtigt werden. Dafür ist die Dichte ρ [kg/m³] des Materials sowie seine spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kg K)] maßgebend.

Als geschlossene mathematische Lösung zur allgemeinen Beschreibung einer zeitlichen, dreidimensional-räumlichen Temperaturänderung in Folge einer inneren Wärmequelle dient die Differenzialgleichung (2-44) nach Fourier (Willems et al. 2012) :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{W}{c \cdot \rho} \quad [\text{K/s}] \quad (2-44)$$

∂	[-]	Formelle Kennzeichnung der partiellen Ableitung (kyrillisches ∂)
T	[K], [°C]	Aktuelle Temperatur des betrachteten Ortes
t	[s]	Zeit
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
c	[J/kgK]	Spezifische Wärmespeicherkapazität
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Materials
x, y, z	[m]	Kartesische Koordinaten
W	[J/sm ³], [W/m ³]	Wärmequelle

Die Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung formuliert den instationären Vorgang der dreidimensionalen Wärmediffusion in einem Stoff. Die spezifische Wärmekapazität c bildet die Fähigkeit eines Materials ab, Wärme zu speichern. Sie beschreibt die Wärmemenge Q [J], die benötigt wird, um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. Zusammen mit der Rohdichte ρ und der Wärmeleitfähigkeit λ ist sie die wichtigste Kenngröße zur Beurteilung des instationären wärmetechnischen Verhaltens von Stoffen. Aus diesen drei Größen (c , ρ , λ) können baupraxis-gerechte weitere Kenngrößen abgeleitet werden, die im Folgenden kurz dargestellt werden (Willems et al. 2012):

Temperaturleitfähigkeit a

Die Temperaturleitfähigkeit oder Temperaturleitzahl a gibt an, mit welcher Geschwindigkeit sich eine Temperaturänderung durch einen Stoff ausbreitet. Sie bildet den ersten Term in der Fourier’schen Wärmeleitungsgleichung (2-44).

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (2-45)$$

a	[m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
c	[J/kgK]	Spezifische Wärmespeicherkapazität
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Materials

In der baupraktischen Anwendung ist sie eine wichtige Kenngröße bei der Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes. Durch sie lässt sich die zeitliche Phasenverschiebung der Temperaturamplituden beim Durchdringen eines Außenbauteils berechnen.

Wärmeeindringkoeffizient b

Analog zur Temperaturleitfähigkeit a dient auch der Wärmeeindringkoeffizient b zur Beurteilung des wärmetechnischen Verhaltens eines Stoffes unter instationären Temperaturrandbedingungen. Er gibt an, wie schnell ein Stoff Wärme an seiner Oberfläche aufnehmen und in sein Inneres weiterleiten kann. Er wird entsprechend Gleichung (2-46) berechnet.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \quad [\text{J}/\text{m}^2\text{K s}^{1/2}] \quad (2-46)$$

b	[J/m ² K s ^{1/2}]	Wärmeeindringkoeffizient
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
c	[J/kgK]	Spezifische Wärmespeicherkapazität
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Materials

Volumenbezogene Wärmekapazität s (Wärmespeicherzahl)

Die Wärmespeicherzahl s ist die auf das Volumen bezogene Wärmekapazität eines Festkörpers. Sie gibt an, welche Wärmemenge erforderlich ist, um 1 m³ eines Baustoffs um 1 K zu erwärmen und steht proportional zur Rohdichte und zur spezifischen Wärmekapazität. Es handelt sich um eine zeitunabhängige Größe und wird nach Gleichung (2-47) berechnet. Je höher die Wärmespeicherzahl des Materials ist, desto mehr Wärme kann von diesem Baustoff gespeichert werden.

$$s = c \cdot \rho \quad [\text{J/m}^3\text{K}] \quad (2-47)$$

s	[J/m ³ K]	Wärmespeicherzahl
c	[J/kgK]	Spezifische Wärmespeicherkapazität
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Materials

Wirksame Wärmespeicherfähigkeit

Für die statische Bewertung des sommerlichen Verhaltens eines Materials auf Raumebene wird die sogenannte wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_{wirk} herangezogen. Sie kumuliert die wirksamen Wärmekapazitäten der raumumschließenden Oberflächen und wird gebildet aus der Summe der Produkte von spezifischer Wärmekapazität, Rohdichte, wirksamer Schichtstärke und Fläche der raumumschließenden Bauteile.

$$C_{\text{wirk}} = \sum_j c_j \cdot \rho_j \cdot d_j \cdot A_j \quad [\text{Wh/K}] \quad (2-48)$$

C_{wirk}	[Wh/K]	wirksame Wärmespeicherfähigkeit des Raumes
c	[J/kgK]	spezifische Wärmespeicherkapazität
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Materials
d	[m]	wirksame Schichtstärke des Materials
A	[m ²]	Fläche des Bauteils

Die Aufsummierung erfolgt für alle Bauteilflächen des Raumes, welche mit der Raumluft in Berührung stehen. Es werden nur die wirksamen Schichtstärken des Materials berücksichtigt⁶. Die so ermittelte Wärmespeicherfähigkeit des Raumes kann auch für die im Nachweis des sommerlichen

⁶ Zur Bestimmung der wirksamen Schichtstärke gelten gem. DIN 4108-2 folgende Regeln:

Für Schichten mit einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda > 0,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,

- die einseitig an Raumluft grenzen, gilt: Aufsummierung aller Schichten bis zu einer maximalen Gesamtdicke von $d_{\text{max}} = 0,10 \text{ m}$;
- die beidseitig an die Raumluft grenzen (Innenbauteile), gilt: halbe Bauteildicke bei einer Schicht, wenn die Dicke $< 20 \text{ cm}$ ist, oder höchstens 10 cm , wenn die Dicke $> 20 \text{ cm}$ ist;
- bei raumseitig vor Wärmedämmschichten liegenden Schichten mit einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda > 0,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ dürfen nur die Dicken der Schichten bis zur Dämmschicht in Ansatz gebracht werden.

Wärmeschutzes nach DIN EN 4108-2 erforderliche Einstufung der Gebäudeschwere: ‚leichte‘, ‚mittlere‘ oder ‚schwere‘ Bauart angewendet werden.

2.5 Raumklima und thermische Behaglichkeit

2.5.1 Bewertungsgrößen des Raumklimas

Die Gebäudehülle ist die Schnittstelle zwischen den in Gebäuden lebenden Menschen und ihrer Umwelt. Sie soll dem Menschen Schutz bieten vor starken Umweltschwankungen und ihn bestmöglich in seiner Tätigkeit unterstützen. Neben den architektonischen Qualitäten der Gebäudehülle und der Innenräume sind einige bauphysikalische Eigenschaften sicherzustellen, um den Komfort der im Gebäude lebenden Menschen zu gewährleisten. Die wichtigsten vier Kategorien des Raumklimas sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 2-6: Übersichtstabelle mit Kategorien von Raumklimateigenschaften





	Raumklimaqualitäten	Bemessungsgrößen
	Hygro-thermische Eigenschaften	Luft- und Oberflächentemperaturen, Strahlungstemperaturen, Temperatursymmetrien und Temperaturgradienten, Luftbewegung, Luftfeuchte
	Vibro-Akustische Eigenschaften	Schallfeld, Hörsamkeit, Lautstärke, Lautheit, Nachhallzeit, Druckpegel, etc.
	Eigenschaften hinsichtlich der Luftqualität	(an-)organische Bestandteile der Raumluft aus Gasen, Dämpfen und Partikeln
	Visuelle Eigenschaften	Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte, Gleichmäßigkeit, Farbtemperatur, Blendung, etc.

Tabelle 2-6 listet die für die bauphysikalische Bewertung des Raumklimas wichtigsten Qualitäten auf. Von besonderem Interesse für das in dieser Arbeit entwickelte Flächenheiz- und Kühlsystem sind dabei die hygrothermischen Eigenschaften des Raumklimas; in Anlehnung an (Grün 2012).

Im folgenden Abschnitt soll daher auf die luftfeuchte- und temperaturbedingten Einflussgrößen des Raumklimas im Allgemeinen und auf die hygrothermische Behaglichkeit des Menschen im Speziellen eingegangen werden.

2.5.2 Verfahren zur Bewertung des Raumklimas

Die DIN EN ISO 7730 2006-05 definiert den Begriff der thermischen Behaglichkeit als das Gefühl des Menschen, welches Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung ausdrückt.

Um diese Zufriedenheit quantitativ beschreibbar und somit für die technische Raumklimaplanung nutzbar zu machen, kann man sich der thermischen Behaglichkeit durch zwei unterschiedliche Ansätze annähern. Diesen Ansätzen liegt die zentrale Annahme einer ausgeglichenen Wärmebilanz des menschlichen Körpers zugrunde. Es wird genau so viel Wärme an die Umgebung abgegeben, wie durch den Metabolismus im Körper freigesetzt wird.

Der erste Ansatz ist eine physiologische Beschreibung der thermischen Behaglichkeit und lautet nach (Benzinger 1979), übersetzt von (Grün 2012) wörtlich:

„Die Abwesenheit von strafenden Impulsen von den Rezeptorfeldern der Kaltrezeptoren der Haut und des wärmeempfindlichen Organs im Hypothalamus.“

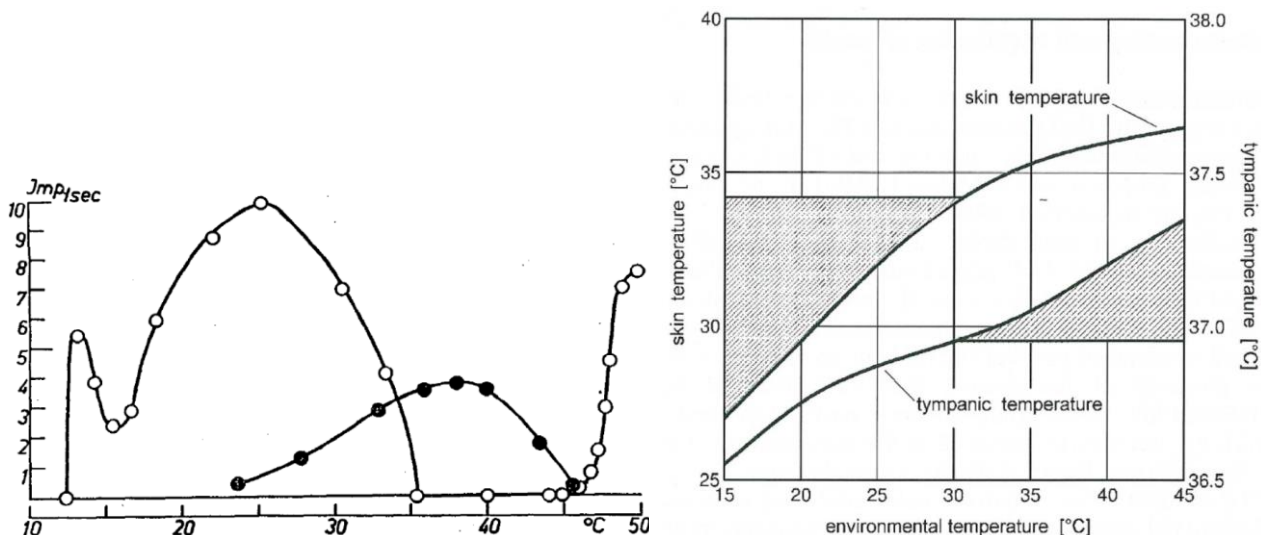


Abbildung 2.27: links: Entladungsfrequenzen von Kalt- und Warmrezeptoren, minimale Stimulation bei 34,5 °C nach (Zoteman 1953); rechts: Haut- und Trommelfelltemperaturen eines Probanden, unbekleidet: schattierter Bereich: thermisch unkomfortabel (Benzinger 1979) aus (Grün 2012)

Dieser kausal-analytische Ansatz ermöglicht eine relativ subjektive Bestimmung eines Temperaturbereiches, in dem ein Mensch aufgrund seines rein physiologischen Empfindens die thermische Umgebung als nicht unbehaglich, also weder zu kalt noch zu warm, beurteilen würde.

Dabei werden medizinische Messungen der elektrischen Impulse unterschiedlicher warm- und kalt-empfindender Rezeptoren in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt. Allerdings ist dieser Ansatz nur unter sehr begrenzten Raumbedingungen wählbar. Für die ganzheitliche Beurteilung der thermischen Behaglichkeit eines Raumes müssen in der Regel einige weitere Einflussgrößen mitberücksichtigt werden.

In Abbildung 2.28 sind die den menschlichen Wärmehaushalt bestimmenden Wärmeübertragungsmechanismen zwischen dem menschlichen Körper und seiner Umgebung aufgetragen. Rechts in der Abbildung sind die Arten Strahlung, Konvektion und Verdunstung in Abhängigkeit der Umgebungslufttemperatur aufgetragen.

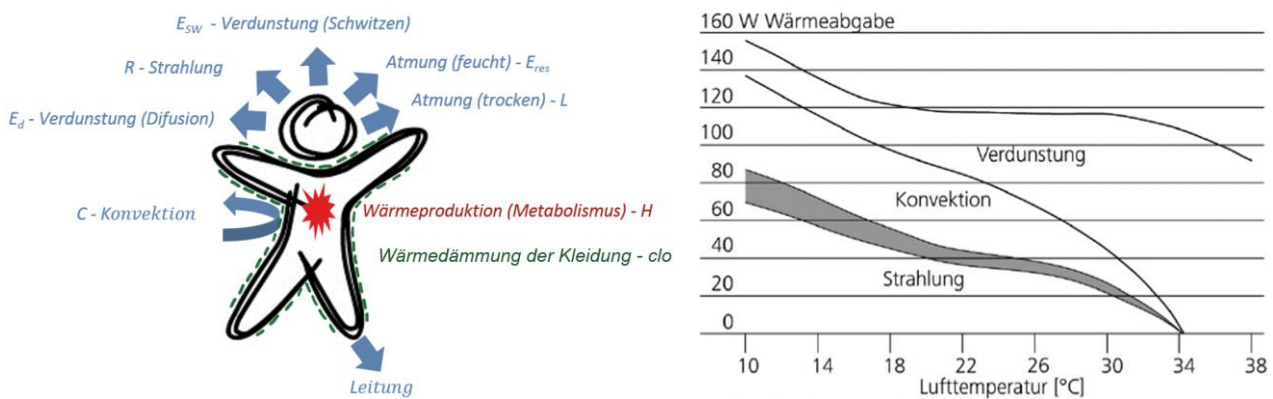


Abbildung 2.28: links: der menschliche Wärmehaushalt, qualitativ, rechts: Wärmeabgabe des Menschen normal bekleidet, ruhend; aus (Albers/Recknagel/Sprenger 2017)

Der zweite Ansatz, ursprünglich nach (Fanger 1970), beruht auf einer empirischen Ermittlung der objektiven Zufriedenheit durch Befragung einer größeren Personengruppe, welche unterschiedlichen Testklimata ausgesetzt war. Die betrachteten Einflussgrößen sind:

- mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung
- Lufttemperatur (gemittelt über der Höhe)
- Luftgeschwindigkeit (turbulenzarm)
- Luftfeuchte
- Aktivität (metabolische Rate)
- Bekleidung (Dämmwirkung der Kleidung und Bekleidungsgrad)

Dabei werden die oben genannten sechs Einflussgrößen auf den menschlichen Wärmehaushalt gewichtet und in einer gemeinsamen Kenngröße dem sogenannten Behaglichkeitsindex PMV (predicted mean vote) ausgegeben. Dieser kann Werte im Bereich $-3 < PMV < +3$ annehmen.

-3 kalt	-2 kühl	-1 leicht kühl	0 neutral	+1 leicht warm	+2 warm	+3 heiß
------------	------------	-------------------	--------------	-------------------	------------	------------

Aus den Skalenwerten des PMV lässt sich, ebenfalls anhand von Befragungswerten, der vorausgesagte Prozentsatz an Personen (Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD) berechnen, welche mit dem jeweiligen Klima unzufrieden sind. Dabei wird angenommen, dass grundsätzlich mindestens 5 % der anwesenden Personen mit dem Raumklima unzufrieden sind (DIN EN ISO 7730:2006-05).

Je wärmer bzw. schwüler das Raumklima ist, desto höher wird der PMV-Index. Werte des PMV im Bereich um Null werden nach DIN EN ISO 7730 bzw. nach Fanger als neutral interpretiert. Hier erreicht der vorhergesagte Prozentsatz an Unzufriedenen sein Minimum von $PPD = 5\%$. Neuere Studien postulieren, dass das 1970 auf Laborversuchen gestützte Modell von Fanger unter realen Bedingungen andere Ergebnisse liefert (Howell/Kennedy 1979). Auf der Grundlage des PMV-Modells nach Fanger stellte (Mayer) ebenfalls Untersuchungen zur Beziehung zwischen dem PMV und dem Anteil an Unzufriedenen (PPD) an. Diese fanden ebenfalls im Labor unter künstlichen Bedingungen statt. Aufgrund der Erkenntnis, dass bereits ein Votum auf der PMV-Skala von -1 (leicht kühl) tatsächlich als unbehaglich eingestuft wird, modifizierten sie den Zusammenhang, indem sie das Optimum des PMV bei +0,4 festlegten und das entsprechende Minimum an Unzufriedenen auf 16 % definierten. Die Arbeit von Araujo & Araujo hat aufgezeigt, dass in natürlich belüfteten Gebäuden 47 % der Nutzer bei einem PMV von Null ‚neutral‘ unzufrieden sind. (Langevin/Wen/Gurian 2013) schlagen ein überarbeitetes Modell, basierend auf Feldversuchen, vor. Mit Daten aus der ASHRAE RP-884 Projekt-Datenbank, welche die Ergebnisse von Feldversuchen aus 160 Gebäuden enthält, wurden zwei neue Verteilungskurven für unterschiedliche Gebäudetypen ‚klimatisiert/HVAC-lila‘ und ‚natürlich belüftet/NV-grün‘ entwickelt. Diese sind in der Abbildung 2.29 rechts illustriert.

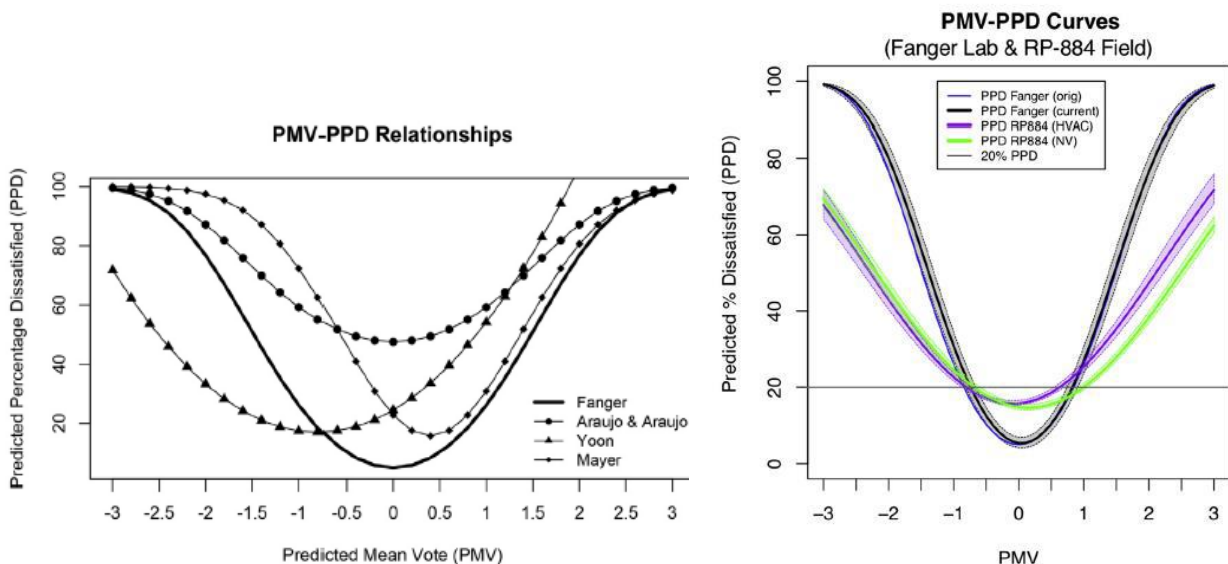


Abbildung 2.29: Zusammenhang zwischen PMV und PPD nach diversen Autoren; links aus: (van Hoof 2008) rechts aus: (Langevin/Wen/Gurian 2013)

Die Ergebnisse nach (Langevin/Wen/Gurian 2013) in Abbildung 2.29 rechts zeigen, dass Beziehungen zwischen PMV und PPD für die auf Feldversuchen basierenden Kurven schwächer sind als bei dem auf Laborversuchen basierenden Modell nach Fanger. Darüber hinaus kann den Ergebnissen entnommen werden, dass die Unbehaglichkeit in natürlich ventilierten Gebäuden (NV) für den warmen Bereich weniger stark ausgeprägt ist als bei Gebäuden mit Raumluftklimaanlage (HVAC). Subsumierend kann festgehalten werden, dass, nach den oben genannten Studien, Nutzer in Gebäuden mit natürlicher Lüftung ein Raumklima im warmen Sektor des PMV als weniger unbehaglich empfinden als bei Gebäuden, in denen eine Raumluftklimaanlage zur Verfügung steht.

Zusätzlich zur Gesamtbewertung der thermischen Behaglichkeit durch den prognostizierten Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) werden in diversen Normen lokale Unbehaglichkeiten durch einen Aufschlag auf den Prozentsatz an Unzufriedenen berücksichtigt. Dabei kann es sich um lokale Abkühlungen oder Erwärmungen einzelner Körperteile durch Zugluft, große vertikale Lufttemperaturgradienten, Strahlungstemperatur-Asymmetrien oder warme bzw. kalte Fußböden handeln. Diese werden mit dem sogenannten PD-Wert (Percentage of Dissatisfied) angegeben. Bei der Projektierung von Raumheiz- und Kühlflächen sind die PD-Werte ein wichtiges Werkzeug, um eine behagliche Raumklimatisierung zu gewährleisten. Im Rahmen von numerischen Raumklimasimulationen können diese Bewertungskurven angesetzt werden, um eine ganzjährige Optimierung des hygrothermischen Raumklimas zu erreichen. Dabei kann je nach Anwendungszweck eine der PMV-PPD-Kurven verwendet werden. In dieser Arbeit wird trotz der oben erwähnten Kontroversen das Modell von Fanger verwendet, da dieses die größte Verbreitung erfahren hat und somit eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit mit weiterer Fachliteratur gewährleistet.

Die operative Temperatur nach (Gagge 1940) ist ein weiterer wichtiger Indikator für die allgemeine thermische Behaglichkeit. In der DIN EN ISO 7730 wird sie beschrieben als gewichteter Mittelwert aus Lufttemperatur und mittlerer Strahlungstemperatur.

$$T_{op} = \frac{h_r \cdot T_r + h_c \cdot T_i}{h_r + h_c} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2-49)$$

T_{op}	operative Temperatur	[$^{\circ}\text{C}$]
T_r	mittlere Strahlungstemperatur	[$^{\circ}\text{C}$]
T_i	Raumlufttemperatur	[$^{\circ}\text{C}$]
h_r	radiativer Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m^2K)]
h_c	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m^2K)]

Bei geringen Temperaturdifferenzen (kleiner 4 K) zwischen mittlerer Strahlungstemperatur und Lufttemperatur kann diese annähernd als Mittelwert der zwei Temperaturen errechnet werden. Dabei muss nach DIN V 18599-10 die operative Temperatur für eine Büronutzung zwischen 20 und 26 $^{\circ}\text{C}$ liegen und die Oberflächentemperaturen der Wände auf einem angemessenen Niveau sein, sodass der Körper keine Strahlungsverluste erfährt. Nach (Hausladen/Tichelmann 2012) sollte die Raumlufttemperatur um nicht mehr als 3 K von der mittleren Strahlungstemperatur aller Umschließungsflächen abweichen.

Für natürlich belüftete Gebäude kann entweder der PMV-PPD-Zusammenhang nach (Langevin/Wen/Gurian 2013) angewendet werden oder der nach DIN EN 15251: 2012-12 geltende sogenannte adaptive Ansatz.

Dieser definiert Grenzfunktionen der operativen Raumtemperatur entsprechend Gleichung (2-49) in Abhängigkeit von der gemittelten Außenlufttemperatur. Damit soll der folgenden psychologischen Komponente der thermischen Behaglichkeit Rechnung getragen werden. Nutzer eines Gebäudes empfinden, sofern das Gebäude frei belüftet wird, ein warmes Innenraumklima als weniger unbehaglich, je höher die Außenlufttemperatur ist. Die Grenzfunktionen der außenlufttemperaturabhängigen operativen Raumtemperatur werden in drei Toleranz-Kategorien angegeben.

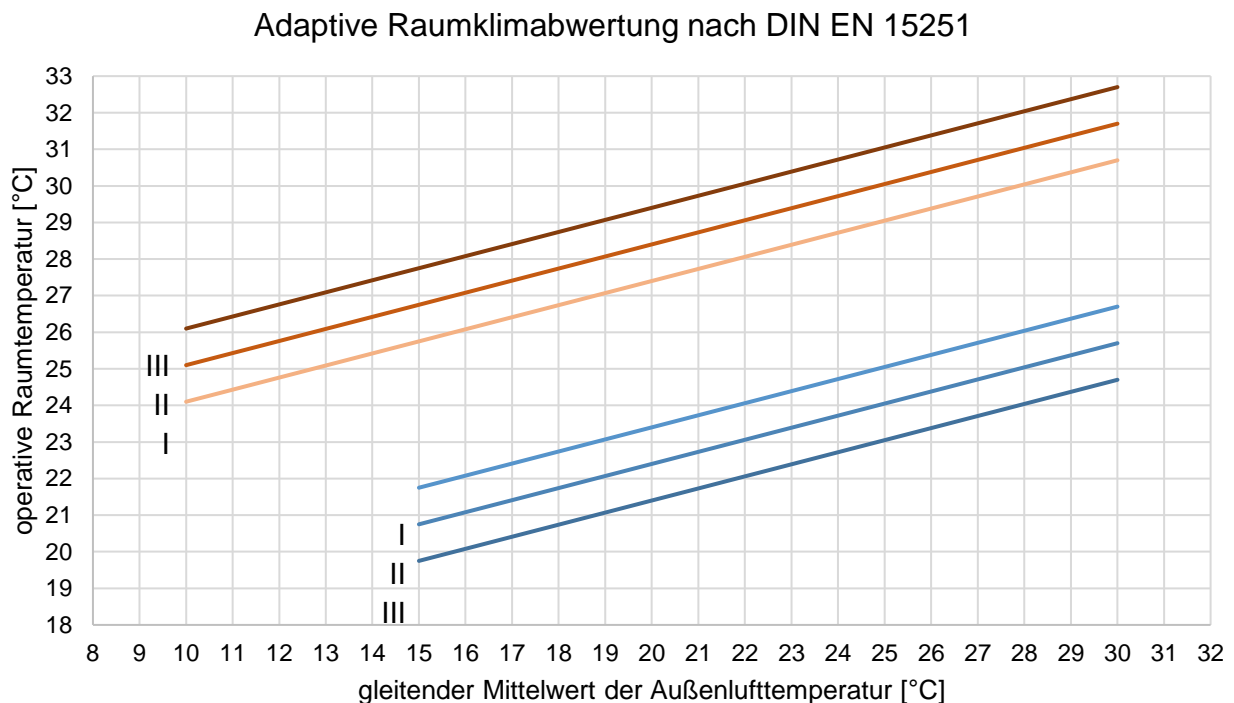


Abbildung 2.30: Auslegungswerte für operative Innenraumtemperatur von Gebäuden ohne maschinelle Kühlanlage, dargestellt als Funktion des gewichteten gleitenden Mittelwertes der Außenlufttemperatur (DIN EN 15251 2012, Kapitel A.2)

Das Verfahren kann angewendet werden, wenn das Gebäude über freie Fensterlüftung verfügt, die Nutzer ihre Bekleidungsrate den Innenraumtemperaturen anpassen können und vorwiegend sitzender Tätigkeit nachgehen. Dies entspricht einer metabolischen Rate zwischen 1,0 met und 1,3 met. Darüber hinaus soll dieses Bewertungsverfahren nur außerhalb der Heizperiode angewandt werden. Eine nicht ausreichend arbeitende Heizung wird nach den anerkannten Regeln der Technik im Gegensatz zum Kühlfall nicht toleriert.

Eine Übersicht von den oben genannten und weiteren einschlägigen Richtlinien und Anforderungen, getrennt nach der Art der Gebäudelüftung, ist in Tabelle 2-7 zusammengestellt.

Tabelle 2-7: Komfortzone ausgewählter Richtlinien mit Angaben zum vorgegebenen Akzeptanzbereich in Abhängigkeit der Anlagentechnik des Gebäudes und der Jahreszeit am Beispiel eines Bürogebäudes; in Anlehnung an (Duncker 2017).

Norm	Jahreszeit	Komfortzone T_{op}	
		Mit RLT-Anlagen	Freie Lüftung
ASR 3.5	Sommer	$T_{op} < 26 \text{ °C}$ für $t_{out} < 26 \text{ °C}$ für $T_{out} > 26 \text{ °C}$ Stufenmodell	
	Winter	$T_{op} > 20 \text{ °C}$	
EnEV 2014	Sommer	Dynamische Gebäudesimulation oder Nachweis nach (DIN 4108-2 2013)	
	Winter	Einhaltung des baulichen Mindestwärmeschutzes	
DIN EN ISO 7730	Sommer	$24,5 \text{ °C} \pm 1,5 \text{ K}$ oder PMV Berechnung	
	Winter	$22,0 \text{ °C} \pm 2,0 \text{ K}$ oder PMV Berechnung	
DIN EN 15251	Sommer	$T_{op} < 26 \text{ °C}$ oder PMV Berechnung	Adaptives Verfahren $T_{op} = 18,8 + 0,33 * T_{out} \pm 3 \text{ K}$ für $10 \text{ °C} < T_{out} < 30 \text{ °C}$
	Winter	$T_{op} > 20 \text{ °C}$ oder PMV Berechnung	Falls $T_{out} < 10 \text{ °C}$ Anforderungen wie bei Gebäude mit RLT
DIN EN 15251: nationaler Anhang	Sommer/ Winter	Adaptives Verfahren $22 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$ für $T_{out} < 16 \text{ °C}$ $18 \text{ °C} + 0,25 * T_{out}$ für $16 \text{ °C} < T_{out} < 32 \text{ °C}$ $26 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$ für $T_{out} > 32 \text{ °C}$	
ASHRAE 55	Sommer	Mollier-Diagramm Behaglichkeitsbereich abhängig von operativer Temperatur und relativer Feuchtigkeit	Adaptives Verfahren $T_{op} = 17,8 + 0,31 * T_{out} \pm 2,5 \text{ K}$ für $10 \text{ °C} < T_{out} < 33,5 \text{ °C}$
	Winter		Falls $T_{out,gl} < 10 \text{ °C}$ Anforderungen wie bei Gebäude mit RLT
ISSO 74	Sommer/ Winter	Beta (ohne Einfluss) $T_{op} = 21,45 + 0,11 * T_{out}, \pm 2,5 \text{ K}$	Alpha (mit Einfluss) $t_{op} = 17,8 + 0,31 * T_{out} \pm 3,5 \text{ K}$

T_{op} operative Temperatur [°C]
 T_{out} Außenlufttemperatur [°C]
 PMV predicted mean vote [-]

2.6 Raumklimatisierung über flächige/bauteilintegrierte Heiz- und Kühlsysteme

2.6.1 Begriffsdefinition

Obwohl `Thermoaktive Bauteilsysteme´ (TABS) im Massivbau seit einigen Jahrzehnten zum Stand der Technik gehören, findet sich in der Fachliteratur noch keine begriffliche Vereinheitlichung dieser Technologie. Gängige Bezeichnungen sind:

- Betonkernaktivierung (BKA)
- Betonkerntemperierung (BKT)
- Thermische Bauteilaktivierung (TBA)
- Thermoaktives Bauteilsystem (TABS)
- Thermisch aktivierte(s) Bauteil(e) (TAB).

Nach DIN EN 15377 Blatt 3 und VDI 6034 werden ausschließlich Temperierungssysteme im zentralen Betonkern als `thermoaktive Bauteilsysteme´ bezeichnet.

Eine weiter gefasste Definition lieferte Glück (Glück 1999). Er bezeichnet als thermische Bauteilaktivierung: ‚[...] grundsätzlich alle Raumbegrenzungen, die sowohl stationär als auch instationär arbeitend zum Kühlen und Heizen des Raumes herangezogen werden.‘ Pfafferott traf 2007 in (Pfafferott/Kalz/Koenigsdorff 2015) eine ähnliche Definition: ‚Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) sind die Systeme, die durch geeignete Bauweise die Gebäudestruktur aktiv in das Energiemanagement des Gebäudes mit einbeziehen.‘ Damit wird die instationär wirkende Speichermasse des aktivierten Bauteils impliziert. In einer engeren Begriffsdefinition nach (Kalz/Koenigsdorff 2016) fallen unter thermisch aktivierte Bauteile ‚[...] alle Rohrsysteme zur Heizung und zur Kühlung, die in Betonbauteile oder andere Massivbauteile integriert sind oder sich in einem, ohne zwischenliegende Wärmedämmung, auf derartigen Bauteilen aufgetragenen Putz oder Estrich befinden und so Oberflächen und Speichermasse der Bauteile gleichermaßen nutzen.‘

Im Sinne der oben genannten Definitionen werden als `thermisch aktivierte Bauteilsysteme´ alle raumabschließenden Bauteile bezeichnet, welche durch aktive interne Temperierung zur Raumklimakonditionierung unter Einbindung ihrer thermischen Speichermasse benutzt werden. Sie wirken dabei gleichzeitig als aktive Wärmeübertragungsfläche und als passiver thermischer Speicher. Die Wärmeübertragung zwischen Bauteil und Raum funktioniert dabei primär über Strahlung und nachrangig über Konvektion.

In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff der `thermisch aktivierten Massivholzelemente´ für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte System verwendet.

2.6.2 Anforderungen der thermischen Behaglichkeit an thermisch aktivierte Raumflächen

Der Mensch mag warme Füße und einen kühlen Kopf. Unter dieser physiologischen Zielsetzung könnte der folgende Abschnitt zusammengefasst werden. Für die Gewährleistung thermisch behaglicher Zustände müssen Raumheiz- und Kühlflächen in ihrer thermischen Leistung auf das Wärmeempfinden der im Raum lebenden Menschen limitiert werden.

Dabei ist einerseits auf die unerwünschte vertikale Lufttemperaturschichtung im Raum zu achten und zum anderen auf das Überhöhungsmaß sowie die Gleichmäßigkeit der Oberflächentemperaturen der raumabschließenden Bauteile. Insgesamt sollten Luft- und gemittelte Strahlungstemperatur nur wenige Kelvin voneinander abweichen und bei üblicher Raumnutzung dem in Abbildung 2.31 links gezeigten Behaglichkeitsfeld entsprechen.

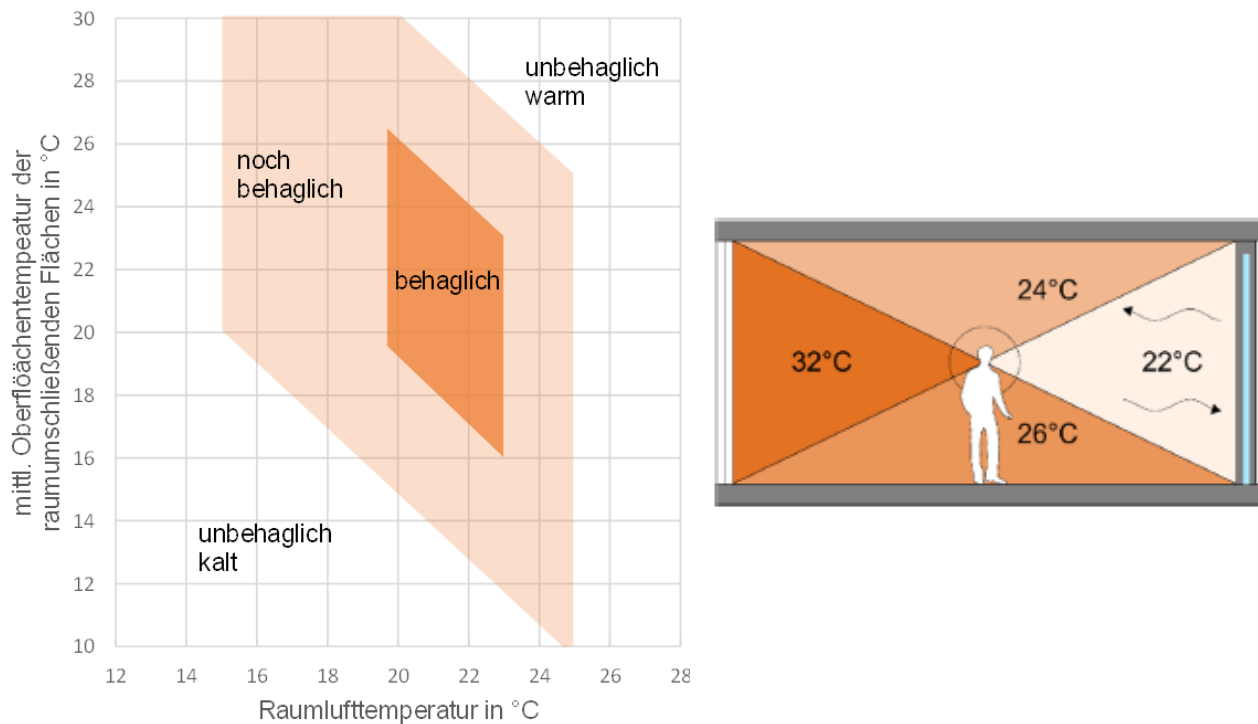


Abbildung 2.31: links: Behaglichkeitsfeld für die Raumlufttemperatur und die gemittelte Temperatur der Umschließungsflächen nach (Frank 1975), rechts: beispielhafte Oberflächentemperaturen der raumabschließenden Bauteile mit rückseitiger Kühlfläche in Anlehnung an (Emmel 2017)

Hohe Strahlungstemperatur-Asymmetrien suggerieren dem Menschen Zugserscheinungen und müssen auf ein unkritisches Maß begrenzt werden. Die Strahlungstemperatur wird je nach Raumrichtung unterschiedlich wahrgenommen. In der DIN EN ISO 7730 sind Komfortkriterien für maximal zulässige Strahlungstemperatur-Asymmetrien festgelegt. Die raumklimatischen Anforderungen werden anhand des Indikators für den prognostizierten Prozentsatz der Unzufriedenen (PD-Indikator) in drei Kategorien des Umgebungsklimas eingeteilt. Anhand der folgenden Tabelle 2-8 sind die zulässigen Grenzwerte der Strahlungstemperatur-Asymmetrie für Raumheiz- und Kühlflächen aufgelistet.

Tabelle 2-8: Grenzwerte der Strahlungstemperatur-Asymmetrie für die Bewertung des Umgebungs-klimas nach DIN EN ISO 7730

Situation	Kategorie A und Kategorie B	Kategorie C
Warme Decke	< 5 K	< 7 K
Kühle Decke	< 14 K	< 18 K
Warme Wand	< 23 K	< 35 K
Kühle Wand	< 10 K	< 13 K

In der DIN EN ISO 7730 und der DIN EN ISO 11855-1 sind neben den oben genannten Anforderungswerten auch die Sensitivitäten der prognostizierten thermischen Behaglichkeit auf die Strahlungstemperatur-Asymmetrien einzelner Raumboberflächen im Heiz- sowie im Kühlfall aufgetragen. Um der Raumklima-Kategorie B zu genügen, darf die von den Raumboberflächentemperaturen ausgehende lokale thermische Unbehaglichkeit einen PD-Wert von 5 % nicht überschreiten. Diese Bemessung gilt unter der Voraussetzung, dass im Ganzen eine thermische Behaglichkeit im Raum gegeben ist. In der folgenden Abbildung 2.32 sind die prognostizierten Prozentsätze an Unzufriedenen durch asymmetrische Strahlungstemperaturen der einzelnen Raumumschließungsflächen dargestellt.

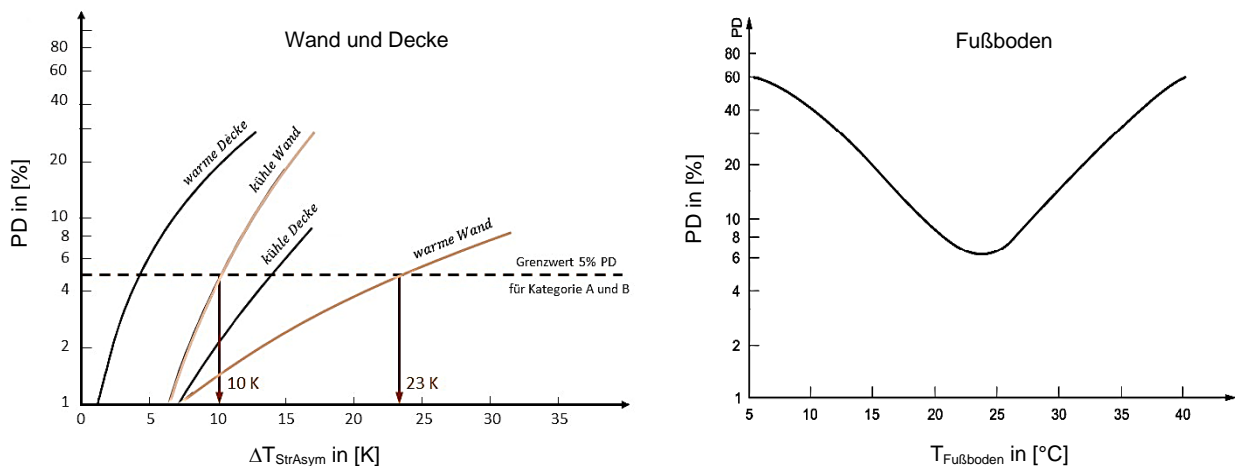


Abbildung 2.32: links: Lokale thermische Unbehaglichkeit durch asymmetrische Strahlungstemperaturen von Wänden und Decken nach (DIN EN ISO 7730:2005) rechts: lokale thermische Unbehaglichkeit durch warme oder kalte Fußbodenoberflächentemperaturen

In der linken Hälfte der Abbildung sind jeweils die Auswirkung von warmen oder kalten Wänden und Decken auf die Zufriedenheit der Raumnutzer abgebildet. Deutlich zu erkennen ist, dass die thermische Behaglichkeit am empfindlichsten durch eine warme Decke beeinträchtigt wird. Dies entspricht dem Sinn der anfangs erwähnten Prämisse ‚Der Mensch mag warme Füße und einen kühlen Kopf‘. Eine Decke, betrieben als Heizung, führt bereits bei geringen Oberflächentemperatur-Erhöhdungen zu stark zunehmendem Unbehagen der von oben angestrahlten Personen.

Im Umkehrschluss könnte ein tendenziöser technischer Richtspruch lauten: ‚Heizen von unten und Kühlen von oben‘. Im Kühlfall lassen sich unter Wahrung der thermischen Behaglichkeit deutlich höhere thermische Leistungen mit der Decke umsetzen. Den wärmephysiologischen Optimalfall der Raumflächentemperierung stellt entsprechend Abbildung 2.32 die Wandheizung dar. Demnach sind Temperaturerhöhungen von bis zu 23 K gegenüber der operativen Raumtemperatur möglich, bis der Grenzwert des PD von 5 % erreicht wird. Währenddessen liegt die Sensitivität einer Wand im Kühlfall leicht über der einer Deckenkühlung. Nach der oben definierten Anforderung darf die Wandoberflächentemperatur einer Kühlwand um bis zu 10 K gegenüber der operativen Raumtemperatur abgesenkt werden. Dieser Wert wird allerdings nur in Einsatzfällen maßgebend sein, da bei feuchteschutz-relevanten Kühlflächen das Tauwasserkriterium bereits bei geringen Temperaturabsenkungen die Leistung der Kühlfläche reduzieren muss. Die Behaglichkeits-Sensitivität der Fußbodentemperatur ist in Abbildung 2.32 rechts in einem eigenen Diagramm aufgetragen. Dabei stellt die Abszisse nicht wie bei den anderen Oberflächen die Differenztemperatur dar, sondern die tatsächliche Fußbodenoberflächentemperatur. Der Grund hierfür ist, dass Fußbodenoberflächen in der Regel direkten

Kontakt mit den Füßen der Nutzer haben und das wärmephysiologische Empfinden des Körpers stark durch den transitiven Wärmefluss zwischen Haut und Fußbodenoberfläche beeinträchtigen. Eine berührte Fußbodenoberfläche wird entsprechend des oben gezeigten Diagramms als am behaglichsten prognostiziert, wenn ihre Temperatur ca. 24 °C beträgt. Abkühlungen der Fußbodentemperatur sind im Rahmen eines behaglichen Raumklimas bei Wohn- oder Büronutzung nur in sehr geringem Maß zulässig, während sich bei geringen Temperaturerhöhungen gegenüber einer, beispielsweise 20 °C betragenden operativen Raumtemperatur, die thermische Behaglichkeit sogar erhöhen kann. Ein konkreter Grenzwert der Oberflächentemperatur von Fußbodenheizungen kann der Auslegungsnorm für flächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung der DIN EN 1264 entnommen werden. Demnach soll die Fußbodentemperatur für Heizzwecke im Daueraufenthaltsbereich auf maximal 29 °C und in Randzonen auf maximal 35 °C begrenzt werden.

Als nächstes folgt eine Diskussion zur Lufttemperaturschichtung im Raum. Vertikale Lufttemperaturschichtungen können insbesondere bei undichten bzw. schlecht gedämmten Gebäuden auftreten sowie bei ungünstig positionierten Heizsystemen, deren Wärmeübergabe primär über Konvektion erfolgt, oder auch bei Deckenheizungen und Kühlfußböden. Analog zu der oben aufgeführten Bewertung der Oberflächentemperaturen beschreibt die DIN EN ISO 7730 auch eine Quantifizierung der lokalen Unbehaglichkeit durch Lufttemperaturschichtung mit Hilfe des PD-Wertes. Die folgende Abbildung stellt den prognostizierten Prozentsatz an Unzufriedenen (PD-Wert) aufgrund von Lufttemperaturunterschieden zwischen der Fuß- und Kopfhöhe einer erwachsenen Person dar. Um der Raumklima-Kategorie B zu genügen, darf die lokale thermische Unbehaglichkeit einen PD-Wert von 5 % nicht überschreiten. Diese Bemessung gilt unter der Voraussetzung, dass im Ganzen eine thermische Behaglichkeit im Raum gegeben ist.

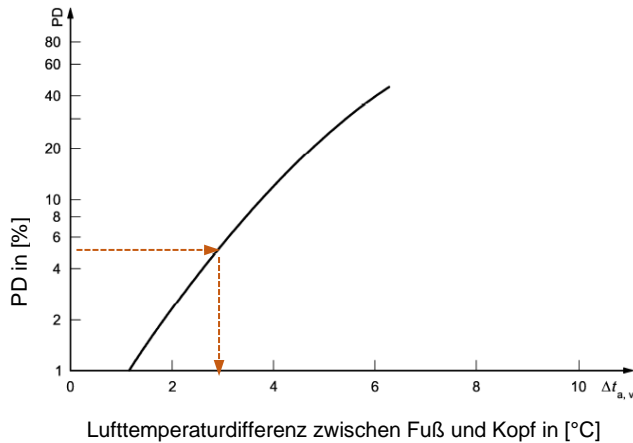


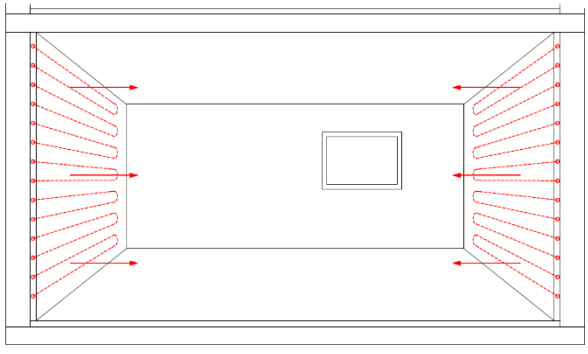
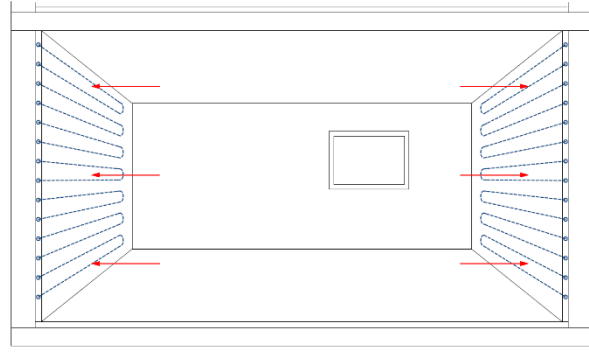
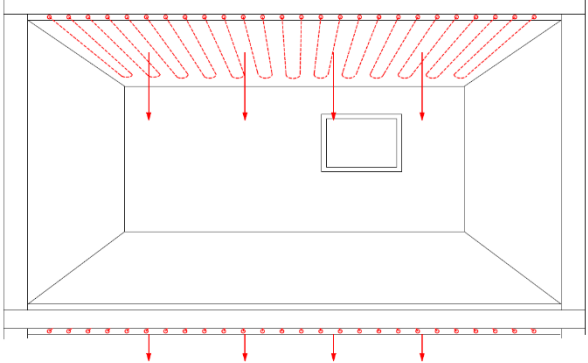
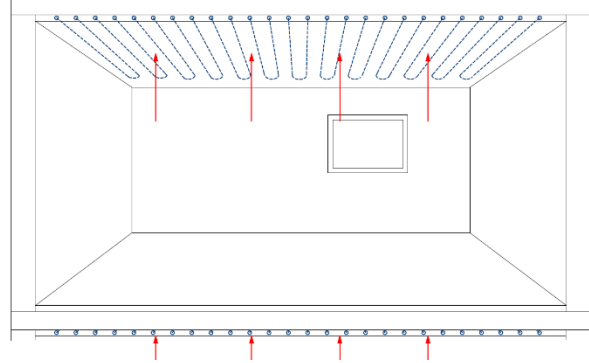
Abbildung 2.33: lokale Unbehaglichkeit durch vertikale Lufttemperaturunterschiede zwischen Fuß- und Kopfhöhe einer erwachsenen Person (DIN EN ISO 7730:2005)

Entsprechend der Abbildung 2.33 sollte die Lufttemperaturschichtung zwischen der Fuß- und Kopfhöhe einer erwachsenen Person nicht mehr als 3 K betragen. Zusammenfassend ist in der folgenden Zusammenstellung eine Bewertung der thermischen Behaglichkeit nach den oben diskutierten Gesichtspunkten sowie eine Bewertung der thermischen Leistung des Systems dargestellt.

Tabelle 2-9: Thermische Behaglichkeit und Leistungsbewertung unterschiedlicher thermisch aktivierter Raumflächen mit Daten zu Strahlungsanteilen aus (Pistohl/Rechenauer/Scheuerer 2016) und Abbildungen aus (Baumgartner 2018)

<p>Fußbodenheizung Strahlungsanteil 60 - 70 % Thermische Leistung: sehr gut Vert. Lufttemperaturgradient: unkritisch Strahlungstemperatur-Asymmetrie: unkritisch, da Limitierung der Berührungstemperatur auf 29 °C</p>	<p>Fußbodenkühlung Strahlungsanteil \approx 99 % Thermische Leistung: sehr gering Vert. Lufttemperaturgradient: teils kritisch ⁷ Strahlungstemperatur-Asymmetrie: nicht vorteilhaft</p>

⁷ Die Leistungsbegrenzung von Fußbodenkühlungen ist aus wärmephysiologischer Sicht stark von der Einbringungshöhe der thermischen Lasten abhängig. Während z.B. eindringende Solarstrahlung auf den Fußboden problemlos abgeführt wird, verursachen thermische Lasten, die im oberen Raumbereich wirken, kritisch große vertikale Lufttemperaturgradienten.

	
<p>Wandheizung (Beispiel) Strahlungsanteil $\approx 90\%$ Thermische Leistung: gut Vert. Lufttemperaturgradient: unkritisch Strahlungstemperatur-Asymmetrie: unkritisch⁸</p>	<p>Wandkühlung (Beispiel) Strahlungsanteil $\approx 90\%$ Thermische Leistung: gut Vert. Lufttemperaturgradient: unkritisch Strahlungstemperatur-Asymmetrie: unkritisch</p>
	
<p>Deckenheizung (Beispiel) Strahlungsanteil $\approx 99\%$ Thermische Leistung: sehr gering Vert. Lufttemperaturgradient: kritisch Strahlungstemperatur-Asymmetrie: kritisch</p>	<p>Deckenkühlung (Beispiel) Strahlungsanteil 60 - 70 % Thermische Leistung: sehr gut Vert. Lufttemperaturgradient: unkritisch Strahlungstemperatur-Asymmetrie: unkritisch</p>

⁸ Thermisch aktivierte Außenwände bedingen die geringste Strahlungstemperatur-Asymmetrie im Raum, da die übrigen Innenwände einen geringen Wärmeabfluss zur Rückseite aufweisen und sich in Folge an die Strahlungstemperatur der thermisch aktivierten Außenwand sowie an die Raumlufttemperatur angleichen. Vgl. Abschnitt: 2.4.6

2.6.3 Historische Betrachtung der thermischen Bauteilaktivierung

Römische Thermalbäder

Bereits in der Antike waren sich die Römer der Vorzüge der Strahlungswärme durch thermisch aktivierte Bauteile bewusst. Sie beheizten die Böden und die Wände in ihren Thermalbädern über heiße Rauchgase, welche durch Hohlbodenkonstruktionen und Wandschächte geleitet und über Dach geführt wurden. Nach der instationären Aufheizung der Boden- und Wandkonstruktionen durch die heißen Rauchgase konnten einige Hypokaustensysteme sogar auf Frischluftbetrieb mit Warmluftauslässen im Raum umgeschaltet werden (Glück 2008).

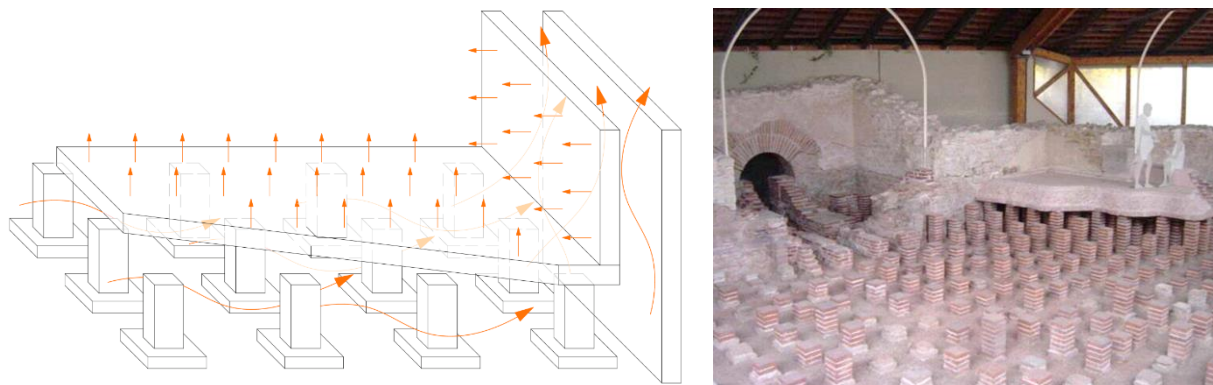


Abbildung 2.34: Schema der historischen Hypokaustenheizung der Römer, rechts Römisches Thermalbad der Stadt Weißenburg in Bayern (Stadtverwaltung Weißenburg i. Bay. 27. 10. 2004), (Bosy 2017)

In Abbildung 2.34 ist links ein Schema der Rauchgasführung in der Hohlbodenkonstruktion und in Wandschächten abgebildet. Rechts ist eine Aufnahme der Römischen Thermen Weißenburg des teilweise offengelegten Reliktes der Römischen Hypokausten-Heizung dargestellt.

Jüngere Geschichte

Erst im 20. Jahrhundert besannen sich die modernen Baumeister nachweislich dieser alten Technologie, als im Jahre 1907 in England das erste Patent für eine Panelheizung erteilt wurde. Anno 1909 wurde schließlich das erste große Gebäude in Liverpool mit einer Anlage der Fa. Crittall ausgerüstet. Erst 1930 wurde eine Pilotanlage in Deutschland (Karlsruhe) gebaut. Dabei handelte es sich um eine Deckenheizung als Schwerkraftanlage mit 5/4" Rohren. Nach 1955 wurden zahlreiche Deckenheizungen in Bürogebäuden in Deutschland installiert. Diese in Betondecken eingegossenen Stahlrohrregister bezeichnete man als sog. ‚Crittalldecken‘. Eine weitere verbreitete Bauform war die sog. ‚Frenerdecke‘. Bei dieser wurden Rohrregister unter die Decke montiert und mit eingeklemmten Blechkassetten verschlossen. Ab 1970 begann die Großanwendung für Fußbodenheizungen mit Kunststoffrohren. Da diese anfangs nicht sauerstoffdicht waren, führte der Einsatz zu erheblichen Korrosionsschäden im übrigen Heizungssystem, welches üblicherweise aus niedriglegierten Stählen, dem sog. ‚schwarzen Material‘ bestand.

Die korrodierten Partikel der angegriffenen Stähle führten zu Verstopfungen in den Kunststoffrohren. Obwohl diese Probleme durch derzeitige konstruktive Lösungen und den Einsatz von sauerstoffdiffusionsdichten Rohrmaterialien in Fußbodenheizungen vollständig behoben werden konnten, haben sich diesbezügliche Vorurteile bis zur Gegenwart erhalten und werden noch immer als Argumente gegen den Einsatz wassergeführter Heiz- und Kühlflächen geführt. Bereits 1937 wurden die ersten Ansätze verfolgt, die bekannten Heizdecken auch zur Kühlung zu verwenden. Diese waren jedoch technisch nicht umsetzbar, da es im regelmäßigen Betrieb zu Taupunktunterschreitungen kam. Erst ab etwa 1990 ermöglichten technisch weiterentwickelte und auf den Kühlbetrieb optimierte Lösungen den Einsatz von wasserführenden Kühldeckenkonstruktionen. In den 1990er Jahren wurde diskutiert, diese Kühldecken-konstruktionen auch wieder im Heizbetrieb einzusetzen, um Investitionskosten zu sparen, was vermehrt auch umgesetzt wurde. Auf der Suche nach weiteren Investitions- und Betriebskosten-reduktionen wurden schließlich massive Bauteilspeicher, i. d. R. Decken, mit integrierten Rohr-registern mit Kaltwasser aus Kühltürmen nachts durchflossen und abgekühlt, um tagsüber Wärme aus den Räumen aufzunehmen. Hier wurden u. a. die Begriffe ‚Betonkernaktivierung‘ oder ‚Thermische Bauteilaktivierung‘ geprägt. Aufgrund der großen thermischen Trägheit dieser Systeme ist eine exakte Regelung der passiven Wärmeaufnahme bisher nicht möglich (Glück 2008). In vielen Einsatzfällen ist zur Gewährleistung einer ausreichend geringen Reaktionszeit ein weiteres raumluftbasiertes Spitzenlastsystem erforderlich.

Aktueller Stand der Technik und Forschung

Das klassische Anwendungsfeld von thermischen Bauteilaktivierungen, nach heutigem Stand, ist der Massivbau. Dort zählt die wasserführende Betonkernaktivierung, wie oben beschrieben, seit ca. 30 Jahren zum Stand der Technik, um energieeffizient die Grundlast der Kühlleistung eines Gebäudes abzudecken sowie ggf. im Winter die Raumheizung zu unterstützen. Seit einigen Jahren werden in diesem Bereich auch Systeme realisiert, die nicht Wasser, sondern Luft als Wärmeüberträger nutzen (Schwenk/Maas 2014). So wurde das System Concretcool der Firma Kiefer im Jahr 2001 in die Betondecken eines Bürogebäudes eingebaut.

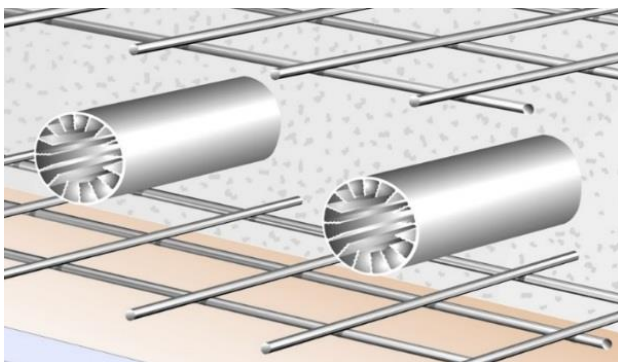


Abbildung 2.35: Das System Concretcool der Firma Kiefer (Maschinenfabrik Gg. Kiefer GmbH)

Bei diesem System handelt es sich um eine Kombination aus einer lüftungstechnischen Anlage und einer luftführenden Bauteilaktivierung, bei der die Raumzuluft als Wärmeüberträger genutzt wird.

Die Raumzuluft wird, bevor sie durch Zuluftauslässe in den Raum geblasen wird, zunächst durch ein Kanalnetz innerhalb der Betondecke geführt. Dafür werden ca. \varnothing 60 mm bzw. \varnothing 80 mm messende Kühlrohre aus hochwärmeleitendem Aluminium achsbezogen in die Betondecken eingegossen. Die Rohre besitzen Rippen auf der Rohrinne-Seite, um die wärmeübertragende Mantelfläche und damit den Wärmefluss von der Luft in den Betonkern zu erhöhen. Die durchströmte Rohrlänge ist bei dem betreffenden Projekt mit 17 m angegeben. Auf der Basis eines simulationsgestützten Systemvergleichs zeigen Schwenk und Maas, dass das System im Kühlfall gegenüber einer klassischen wassergeführten Variante hinsichtlich des Nutzenergiebedarfes bei gleichem Komfort deutlich besser abschneidet. Im Heizbetrieb hebt sich dieser Vorteil während der Übergangszeit jedoch wieder auf. In dieser Zeit wirkt die träge Masse als ‚unbeabsichtigte Kühlung‘, was den Heizenergiebedarf erhöht. Als vorteilig wird erwähnt, dass die Austrittstemperatur der Raumluft aus dem System fast schwankungsfrei bei 21 °C liegt. Die Raumzuluft hat beim Durchströmen des im Betonkern liegenden Rohres die Temperatur des massiven Bauteils angenommen. (Maschinenfabrik Gg. Kiefer GmbH) Bedenkenswert ist bei diesem System, dass die Raumluft durch ein Rohrsystem geführt wird, in dem bei ungünstigen Temperatur- und Luftfeuchtekonstellationen eine Tauwasserbildung nicht ausgeschlossen werden kann. Ein einmaliger Tauwasserausfall in den Aluminiumrohren ist unkritisch. Wenn jedoch eine regelmäßige Tauwasserbildung in den Zuluftrohren aufträte, könnten hier habitable Bedingungen für Keime entstehen.

Massivholzplatten mit Funktionselementen in der Mittellage

Die Idee der thermischen Bauteilaktivierung wurde bereits auch auf den Massivholzbau übertragen. Von 2012 bis 2015 wurde am Internationalen Verein für Technische Holzfragen e. V. und am Institut für Holztechnologie der TU Dresden ein Forschungsvorhaben mit dem Titel ‚Massivholzplatten mit Funktionselementen in der Mittellage‘ durchgeführt (Wehsener et al. 2016).

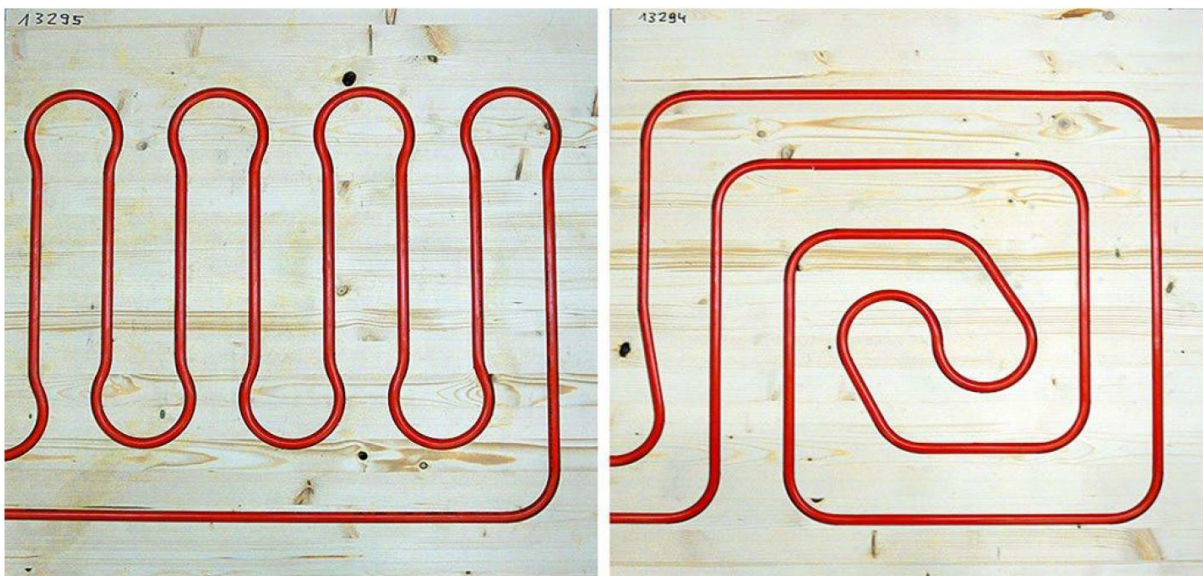


Abbildung 2.36: Massivholzplatten mit Funktionselementen in der Mittellage aus einem Forschungsprojekt des Internationalen Vereins für Technische Holzfragen e. V.;(Wehsener et al. 2016)

Es wurden dreilagige Massivholzplatten unterschiedlichen Lagenaufbaus mit integrierten Wasserrohren entwickelt, ähnlich einer Fußbodenheizung. Dabei wurden sowohl das Rohrverlegeschema als auch der verwendete Klebstoff getestet. Anschließend wurden die Biegefestigkeit, die Formstabilität sowie die Verklebungsqualität untersucht, um den Einfluss der Kanäle auf die Festigkeit einerseits und den Einfluss der Feuchte- und Temperaturschwankungen auf die Eigenspannungen andererseits zu beurteilen. Zusätzlich wurden Kleinraumversuche durchgeführt, um Aussagen bezüglich des Aufheiz- und Abkühlverhaltens treffen zu können (Wehsener et al. 2016).

Das Forschungsprojekt zeigt, dass der Ansatz umsetzbar ist und dass viel Potenzial zu Produktentwicklungen für die Brettsperrholzindustrie und die Hersteller von Flächenheiz- und Kühlsystemen darin liegen (Gecks/Plagge 2015).

Bei Wänden in Ziegelbauweise findet dieses Prinzip ebenso Anwendung. Dort kommen neben wasserführenden Systemen, wie z. B. die Ziegelwandtemperierung der Firma Wienerberger (Wienerberger AG) auch luftgeführte Hypokausten-Heizungen wie z. B. das System Hypothermal (Spernau 2019) zum Einsatz. Beim letztgenannten System zirkuliert Luft als Wärmeträgermedium in einem geschlossenen Kreislauf innerhalb der Wand. Von einem Heizregister im unteren Teil der Wand erwärmt, strömt die Luft nahe der raumseitigen Wandoberfläche durch vertikale Luftkanäle in den Ziegeln und erwärmt diese.

2.6.4 Voraussetzungen und Planungskriterien für thermoaktive Bauteilsysteme

Für Neubauten zählen thermisch aktivierte Bauteile (TABs) bereits seit den 2000er Jahren zum Stand der Technik und werden in vielen Projekten umgesetzt. Sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb kann das System aufgrund seiner großen wärmeübertragenden Fläche sehr nahe an der gewünschten Raumtemperatur betrieben werden. Praxiserfahrungen belegen, dass durch diese Technologie ein hohes Maß an thermischer Behaglichkeit und gleichsam eine hohe Energieeffizienz erreicht werden kann (Pfafferott/Kalz/Koenigsdorff 2015). Die moderaten Vorlauftemperaturen begünstigen den direkten Einsatz von Umweltenergie, wie beispielsweise die solarthermische Heizung oder die freie Grundwasserkühlung. Bei diesen Systemen wird lediglich die Hilfsenergie benötigt, um das wärmeübertragende Fluid zwischen Wärmequelle und Wärmesenke zu zirkulieren. Auch beim indirekten Einsatz von Umweltenergie kann das Gesamtsystem umso effizienter betrieben werden, je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Raumsolltemperatur und der notwendigen Vorlauftemperatur des Heiz- bzw. Kühlsystems ist. Beispiele hierfür sind die Geothermie mittels Wärmepumpe oder eine Luftwasserwärmepumpe, bei der die Wärme der Außenluft auf einem sehr niedrigen Temperaturniveau entnommen wird und dann auf das zur Raumbeheizung notwendige Temperaturniveau gehoben werden muss. Vereinfacht gesagt: Je höher der Temperaturhub der Umweltwärme, desto mehr Hilfsenergie benötigt die Wärmepumpe, um diese Arbeit zu verrichten. Das Verhältnis zwischen nutzbarer Energie und aufgewendeter Hilfsenergie wird durch die Leistungszahl der Wärmepumpe, dem sogenannten COP (engl. Coefficient of Performance) beschrieben.

Die Integration des Heiz- und Kühlsystems in die raumabschließenden Bauteile ermöglicht zudem eine Nutzung der konstruktiv erforderlichen thermischen Speichermasse, um das System, wie in der Einleitung dieser Arbeit beschrieben, noch effektiver mit fluktuierenden erneuerbaren Energien zu betreiben. Mögliche Lastverschiebungen der Heiz- und Kühlleistung durch die im Bauteil gespeicherte Wärme sind die Grundvoraussetzung für den Betrieb netzreaktiver Gebäude. Die große Trägheit des Systems und die vergleichsweise geringe Leistung einer thermischen Bauteilaktivierung ist gleichzeitig aber ein Nachteil für die präzise Regelbarkeit des Raumklimas. Auf plötzlich auftretende Störgrößen reagiert das System träge und bei falsch parametrierter Regelung mit zeitversetzten Überreaktionen. So ist es möglich, dass in Folge einer starken Erwärmung des Raumklimas, beispielsweise durch solare oder interne thermische Lasten, eine Kühlreaktion des Systems erst nach Stunden spürbar wird und dann deutlich zu stark ausfällt und das Raumklima bis unter die Komforttemperatur herunter gekühlt wird. Die Nutzerzufriedenheit wird insbesondere durch die zuletzt beschriebene Überreaktion der Regelung beeinträchtigt, da diese weniger vorhersehbar ist als eine nicht hinlängliche oder ausbleibende Reaktion der Regelung.

Ferner bedingen derartige Überreaktionen der Raumtemperaturregelung, beispielsweise infolge einer unkontrollierten Lüftung in der Übergangszeit, einen unnötig erhöhten Energiebedarf zum Ausgleich des Lüftungsbedingten Raumtemperaturabfalls.

Um diesen Problemen aus dem Weg zu gehen, sollte der Einsatz von thermischen Bauteilaktivierungen stets im Zusammenhang mit einem optimierten passiven Gebäudeenergiekonzept gesehen werden. Der winterliche Wärmeschutz sollte den aktuellen Anforderungen an den Dämmstandard und an die Luftdichtheit der Gebäudehülle entsprechen. Für den Einsatz von thermisch aktivierten Bauteilen muss darüber hinaus insbesondere auch der sommerliche Wärmeschutz gewährleisten, dass plötzlich auftretende potenzielle Kühllastspitzen bereits in der Ursache reduziert werden. Allen voran ist in diesem Zusammenhang ein effektiver Sonnenschutz zu nennen. Sofern die Optimierung der passiven Maßnahmen nicht oder nur begrenzt umsetzbar ist, können entweder leistungsstärkere bzw. oberflächennahe TABS eingesetzt werden, die schneller auf anfallende Lasten reagieren. In Nutzungsbereichen, wo erhöhte Komfortbedingungen gefordert sind, kann durch die Kombination mit einem Zusatzsystem mit geringerer Einschaltverzögerung reagiert werden. Das TAB-System wird für die Grundlastdeckung ausgelegt und das Zusatzsystem für die Abfuhr kurzzeitiger Lastspitzen (Pfafferott/Kalz/Koenigsdorff 2015).

Lüftungswärmeverluste sollten auf den erforderlichen hygienischen Mindestluftwechsel begrenzt werden. Optional kann dieser mit einer bedarfsgeführten Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung weiter reduziert werden. Da eine thermische Bauteilaktivierung, wie alle Flächenheiz- und Kühlsysteme, primär über Wärmestrahlung arbeitet, kann bei gleichbleibender operativer Raumtemperatur die Temperatur der Raumluft abgesenkt werden. Hierdurch könnten Lüftungswärmeverluste sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb weiter reduziert werden.

3 Konzept der thermisch aktivierten Massivholzelemente

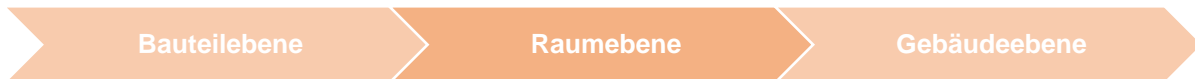
3.1 Systemtheoretische Einordnung

Mechanische und funktionale Zusammenhänge zwischen Bauteilen, Baugruppen und Bausystemen werden zunehmend komplexer, um den gegenwärtigen und künftigen Anforderungen der Baupraxis zu genügen. Diese wachsende Komplexität muss von allen an der Planung und am Bau beteiligten Akteuren getragen werden. Eingespielte Routinen müssen bisweilen fundamental neu gedacht und Bauteammodelle neu geregelt werden. Dabei spielen die Art und Weise der Schnittstellendefinitionen zwischen den baulichen und funktionalen Einheiten sowie die Größe der Einheiten eine organisatorisch bestimmende Rolle. Systemtheoretisch können Bausysteme, Baugruppen und Bauteile jeweils als Systeme und Subsysteme betrachtet werden. Aus der organisatorischen Perspektive des Gesamtplaners eines Bauwerks sollte die Systemarchitektur modular, mit klar abgegrenzten Subsystemen, den funktional-technischen Baugruppen, erscheinen. Durch eine freie Kombinatorik dieser standardisierten Module entsteht die Individualität eines komplexen modernen Bauwerks. Erst innerhalb der Subsysteme offenbart sich der integrale Charakter der Systemarchitektur. Notwendige mechanische und funktionale Interdependenzen wie Fügungen, Aussparungen, Durchdringungen und Abdichtungen sollten auf der Ebene der standardisierten Subsysteme erfolgen. Je standardisierter das Modul, desto höher die produzierbare Stückzahl und umso gerechtfertigter ein hoher Entwicklungsaufwand der integralen Einheit. Aus wirtschaftlicher Perspektive betrachtet und unter Wahrung der Individualität eines Bauwerks, ist eine Reduktion der Komplexität durch eine hohe Modularität der Systemarchitektur erstrebenswert. Diese lässt sich nur dann erzielen, wenn die Systemgrenzen klar definiert und die integralen Zusammenhänge innerhalb der Einheit robust und bis zur Perfektion optimiert sind. Diesem Paradigma liegt die Struktur dieser Arbeit zu Grunde. Das im Rahmen dieses Promotionsverfahren entwickelte System soll beispielhaft auf der Grundlage eines standardisierten Brettsperrholz-Standardproduktes beruhen. Das Ziel der Entwicklung ist, dieses Standardprodukt um die Funktionen Heizen und Kühlen zu erweitern. Für die spätere Projektierung des Systems im konkreten Einsatzfall soll dem Planer das notwendige Auslegungswerkzeug mit an die Hand gegeben werden, mit dem er maximale Planungssicherheit genießt und Konfigurationen nur außerhalb der Systemgrenzen vornehmen muss.

3.2 Konzeptvorstellung

3.2.1 Konzeptstruktur

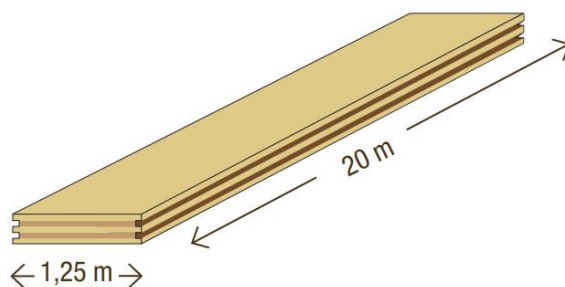
Die Erstellung des Konzeptes der in dieser Arbeit entwickelten thermischen Aktivierung von Massivholzelementen soll in drei aufeinander aufbauenden Systemebenen vorgestellt werden.



Nach dieser Systematisierung richtet sich die Gliederung der folgenden Abschnitte.

3.2.2 Konzept auf Bauteilebene

Die Grundlage für das zu entwickelnde thermisch aktivierte Massivholzelement ist ein standardisiertes Brettspertholzelement. Beispielhaft, um mit genormten Geometrien arbeiten zu können, wurde in der Arbeit das Produkt BBS 125 verwendet (Binderholz GmbH 2019). Die Aufgabe des Systems ist die funktionale Erweiterung des Produktes um die Fähigkeit einer aktiven Raumklimatisierung.



Aufbau:	3-, 5-, 7-schichtig
Breite:	1,25 m
Länge:	max. 20 m
Stärke:	60 bis 200 mm
Lamellenstärke:	20, 30, 35, 40 mm

Abbildung 3.1: Das Beispielprodukt für die Entwicklung thermisch aktivierter Massivholzelemente; aus: (Binderholz GmbH 2019)

Durch eine integrierte thermische Aktivierung soll es ermöglicht werden, das industriell fertig konfektionierte Brettspertholzelement mit raumseitig sichtbarer Holzoberfläche als Heiz- und als Kühlsystem zur Raumklimakonditionierung zu verwenden. Dabei sollen wasser- oder luftführende Rohre bzw. Kanäle nahe der raumseitigen Oberflächen in das Element gefräst und eingeklebt werden. Die Fluidkreisläufe sollen so in das Massivholzelement integriert werden, dass ein optimaler Kompromiss zwischen der thermischen Leistung des Systems und den brand-, schall-, feuchte- und wärmeschutz- sowie tragwerksrelevanten Eigenschaften des Brettspertholzes erreicht wird. Die versorgungstechnische Schnittstelle zwischen dem thermisch aktivierten Massivholzelement und dem Versorgungsnetz im Gebäude soll als standardisierter Anschlusspunkt im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden. In der Abbildung 3.2 ist beispielhaft das Schema eines thermisch aktivierten Massivholzelements als luftführendes Wandelement mit Anschlusspunkt in der Versorgungsebene des Fußbodenaufbaus dargestellt.

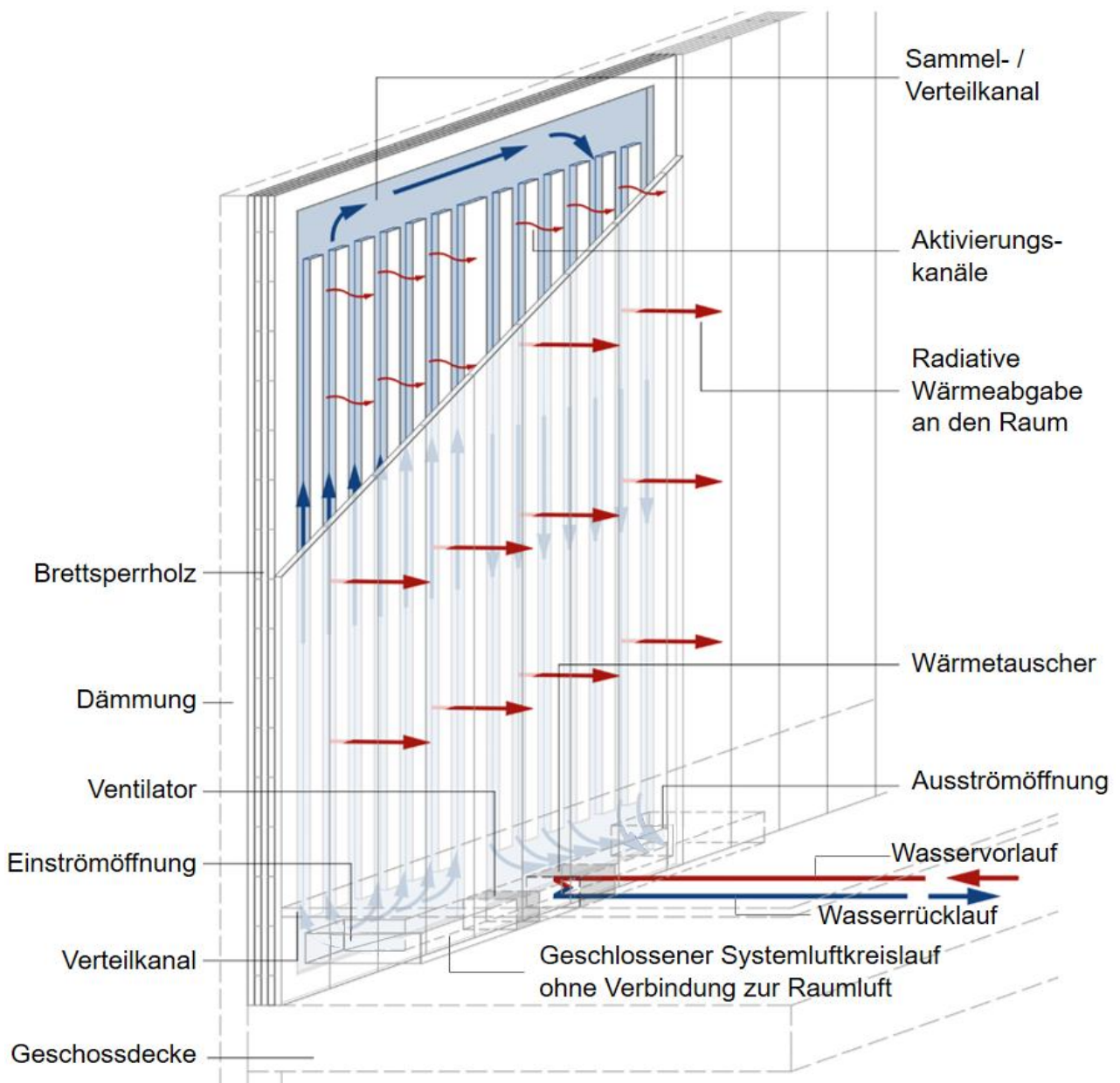


Abbildung 3.2: Schema eines luftführenden thermisch aktivierten Massivholzelements; in Anlehnung an (Baumgartner 2018)

In der obenstehenden Abbildung ist die thermische Aktivierung mittels geschlossenem Systemluftkreislauf realisiert. Die Schnittstelle ist in diesem Beispiel eine Luftkonditionierungseinheit mit Wasser-Luft-Wärmetauscher. Die Systemluft wird außerhalb des Massivholzelements auf die notwendige Temperatur gebracht und mittels eines Ventilators zirkuliert. Durch das hydraulisch abgeglichenen, doppelharfenförmigen Kanalarrangement, nahe der raumseitigen Oberfläche, ist eine gleichmäßige Durchströmung des gesamten Elements gewährleistet.

Die Gleichmäßigkeit der Wärmeabgabe richtet sich nach dem Temperaturverlauf des Systemluftkreislaufs, der aus diesem Grund eine begrenzte Länge haben muss.

3.2.3 Konzept auf Raumebene

Thermisch aktivierte Massivholzelemente sind als Fußboden-, Wand- oder als Deckenelemente konfigurierbar. Die Entscheidung, welche der raumabschließenden Bauteile für ein Projekt der Raumklimakonditionierung verwendet werden sollen, richtet sich unter anderen nach den folgenden Kriterien:

- versorgungstechnische Erschließbarkeit der Fläche,
- raumklimatische Eignung der Fläche zum Heizen und/oder zum Kühlen (vgl. Abschnitt 2.6.2),
- Freisichtigkeit der Fläche zum Raum (Möblierung des Raumes vor der Fläche) und
- Standardisierbarkeit des Elementformates.

Die versorgungstechnische Erschließbarkeit betrifft die Erreichbarkeit der Element-Anschlusspunkte für die wasserführenden Anbindungsleitungen. Diese Eignung ist sehr projektspezifisch. Die Erreichbarkeit eines Wandelements scheint am wahrscheinlichsten, da die Anschlusspunkte in der Versorgungsebene des Fußbodenaufbaus liegen. Deckenelemente sind denkbar, wenn die Anschlusspunkte beispielsweise in der abgehängten Decke des eigenen oder des benachbarten Raumes, wie etwa eines Flures, liegen. Fußbodenelemente wären gleichsam erreichbar wie eine klassische Fußbodenheizung, allerdings erscheint der Anwendungsfall eher unwahrscheinlich, dass ein Brettsperrholzelement als begehbare Fußbodenabschlusschicht verwendet wird. Dennoch, thermisch aktivierte Fußböden eignen sich aus physikalischer und wärmephysiologischer Sicht hervorragend zum Heizen, allerdings nur sehr eingeschränkt zum Kühlen. Das exakte Gegenteil trifft für Decken zu. Dagegen sind Wandelemente mindestens unkritisch und im Heizbetrieb sogar vorteilhaft, sowohl bei der thermischen Behaglichkeit als auch mit Blick auf die neigungsabhängige Wärmeabgabe an den Raum.

Ähnlich projektspezifisch wie die versorgungstechnische Erschließbarkeit ist die Bewertung der Freisichtigkeit der einzelnen Raumboflächen. Tendenziell sind Decken am wenigsten verbaut durch die Raummöblierung, jedoch ist stets der Platzbedarf von technischen Installationen wie der Beleuchtung, Lüftungsanlagen und Schallabsorber zu berücksichtigen. Fußböden sollten frei von stark isolierenden Belägen wie Teppichen o. ä. sein. Bereiche des Fußbodens, auf dem planmäßig feste Möblierung vorgesehen ist, wie beispielsweise in Küchen, sollten in der Auslegung der Flächenheiz- und Kühlsysteme nicht berücksichtigt werden. Die Verfügbarkeit von unverbauten Wandflächen ist ebenfalls ausgesprochen projektspezifisch. Werden Regale vor die thermisch aktivierten Wandelemente montiert, verringert sich insbesondere deren radiative Wärmeabgabe an den Raum. Wandflächen, vor denen nicht hinterlüftete, geschlossene Schränke stehen, sollten nicht thermisch aktiviert werden. Das Thema der Standardisierung ist elementar für die baupraktische Umsetzbarkeit des entwickelten Systems.

Es wird vermutet, dass die Formatierung von Fußboden- Wand- und Deckenfertigelementen bei Wandelementen im Bereich üblicher Geschosshöhen den höchsten Grad der Standardisierung erlaubt, sofern die Grundrisse auf der Grundlage der entsprechenden Achsrastermaße systematisiert sind.

Entscheidung: Für die weiterführende Konzeptentwicklung wird die Konfiguration ‚thermisch aktiviertes Wandelement‘ weiterverfolgt. Dieses Einsatzszenario erscheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt, nach Abwägung der beiden projektspezifischen Gründe 1.) der Erschließbarkeit und 2.) der Freisichtigkeit auf den Raum, am wahrscheinlichsten. Aus projektunabhängiger Perspektive erscheint nach den oben angesprochenen, physikalischen und wärmephysiologischen Eigenschaften das Wandelement als die sinnvollste Wahl für die notwendige Eingrenzung von Entwicklungsvarianten. Auch die oben angesprochene Standardisierbarkeit der Elementformate spricht nach der Einschätzung des Autors für diese Entscheidung. Nach der genannten Festlegung soll die weitere Entwicklung der thermisch aktivierten Massivholz-Wandelemente auf die Bauteile in der folgenden Graphik abzielen.

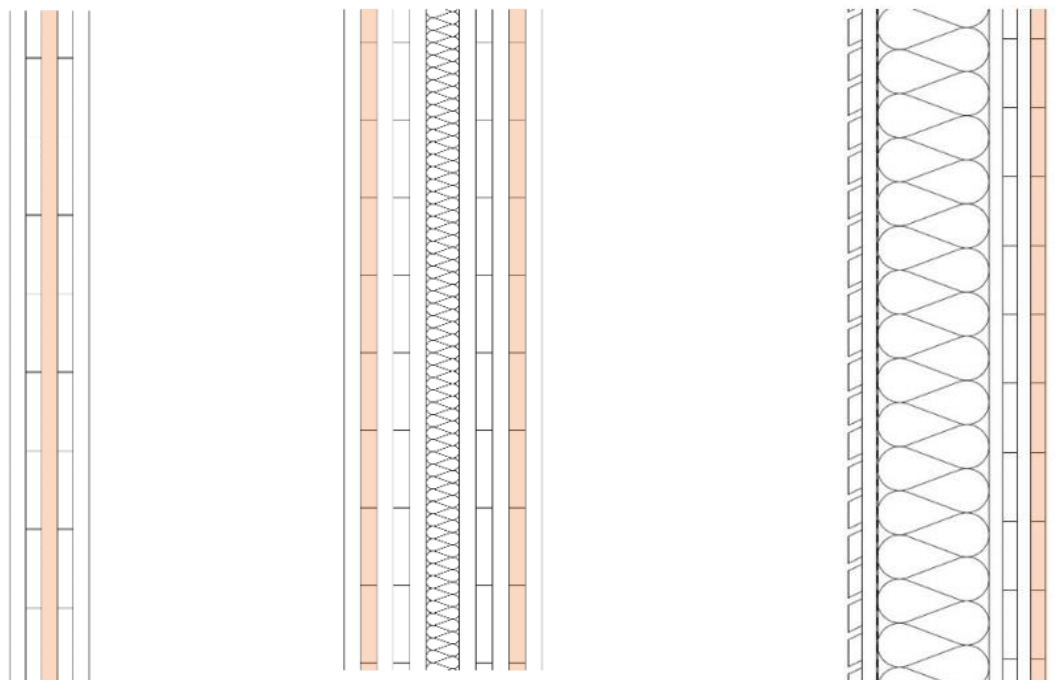


Abbildung 3.3: Mögliche Konfigurationen von thermisch aktivierten Massivholzelementen; links: Innenwand, Mitte: Zonen-/ Wohnungstrennwand; rechts: Außenwand

Abbildung 3.3 zeigt drei Konfigurationen von thermisch aktivierten Wandelementen. Die rötliche Einfärbung soll jeweils die Lage der wärmetragenden Fluidkreisläufe andeuten. Die links dargestellte thermisch aktivierte Innenwand ist regelungstechnisch möglich, wenn die Wand als Raumteiler dient oder es sich um eine Trennwand von zwei gleichartig genutzten und nicht mit Einzelraumregelung betriebenen Räumen handelt.

Die folgende Abbildung soll zum allgemeinen Verständnis der Größensystematik des standardisierten Wandelements dienen. In Anlehnung an übliche Brettsperrholzausgangsformate lassen sich Vorgaben für den Architekten bei der Systematik der Grundrissplanung ableiten.

Durch die konsequente Einhaltung des Standard-Rastermaßes von 1250 mm kann nicht nur der Verschnitt des Brettsperrholzes beim Abbund minimiert werden. Es hilft auch, die für die thermische Aktivierung nutzbare Fläche zu maximieren.

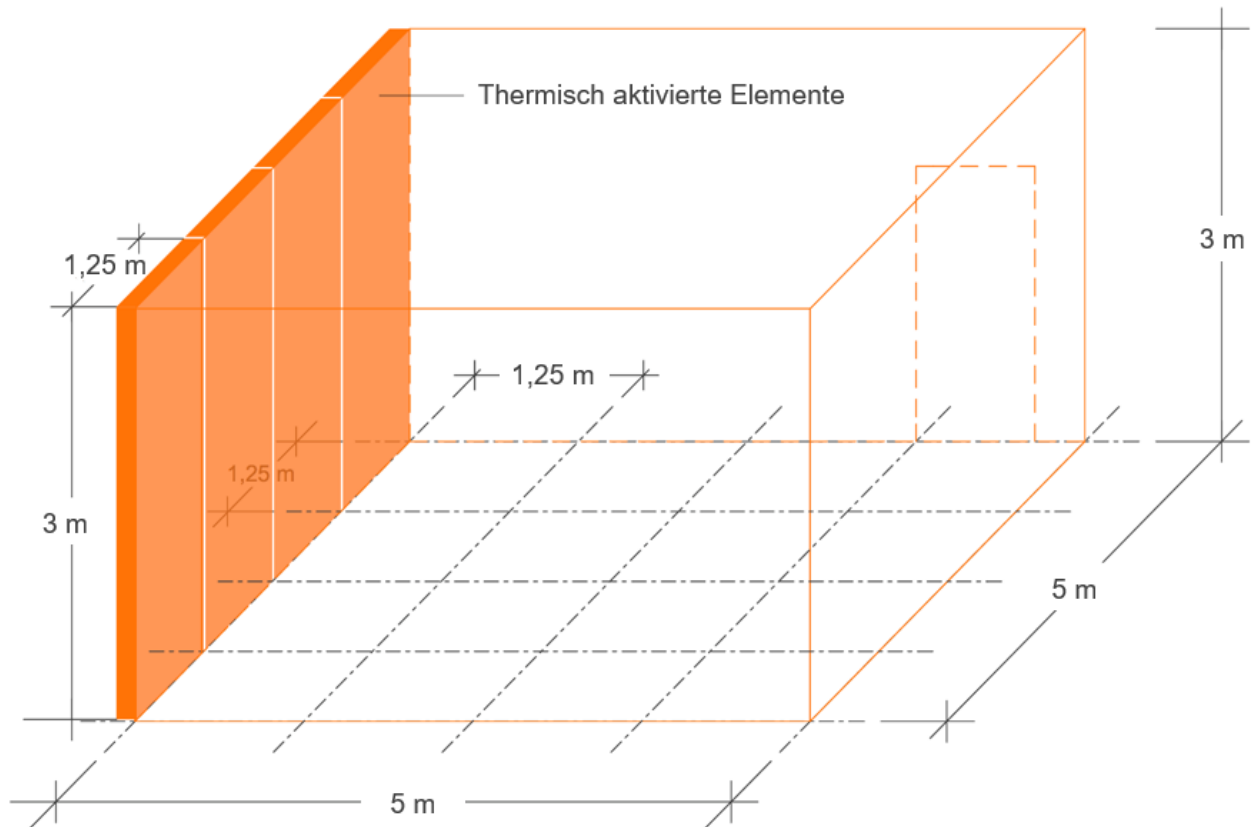


Abbildung 3.4: Schema eines Büroraumes mit thermisch aktivierten Wandelementen und einem Achsraster von 1,25 m

Durch die Standardisierung der thermisch aktivierten Massivholzelemente werden nur vollständig an einen Raum angrenzende 125er-Brettsperrholzelemente zur Klimatisierung des Raumes nutzbar sein. Geht die Länge einer Raumwand nicht vollständig in dem 125er-Raster auf, so können nicht alle Wandelemente aktiviert werden. Im Bereich von Wandanschlüssen ist dieses Problem nicht ganz vermeidbar. Es kann allerdings durch die Wahl der Montagerichtung optimiert werden.

In den folgenden zwei Abbildungen sind mögliche Einsatzszenarien, die in Kapitel 6 näher erläutert werden, dargestellt.

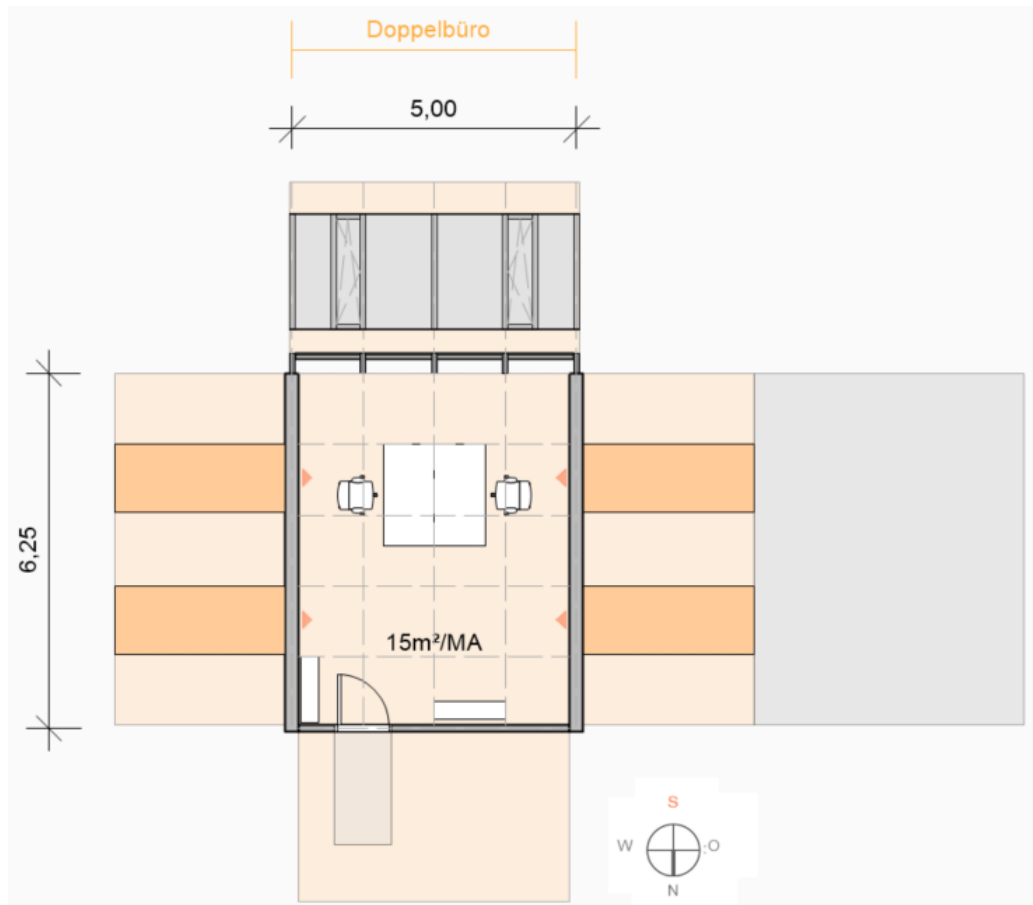


Abbildung 3.5: Doppelbüro mit ca. 30 m² Grundfläche, vollverglaster Fassade mit außenliegendem Sonnenschutz, vier thermisch aktivierte Massivholzelemente

Entsprechend der Raumheiz- und Kühllast sind die erforderlichen, thermisch aktivierten Wandelemente in braun dargestellt. Für das gezeigte Doppelbüro werden vier Einheiten des standardisierten, thermisch aktivierten Massivholzelements benötigt.

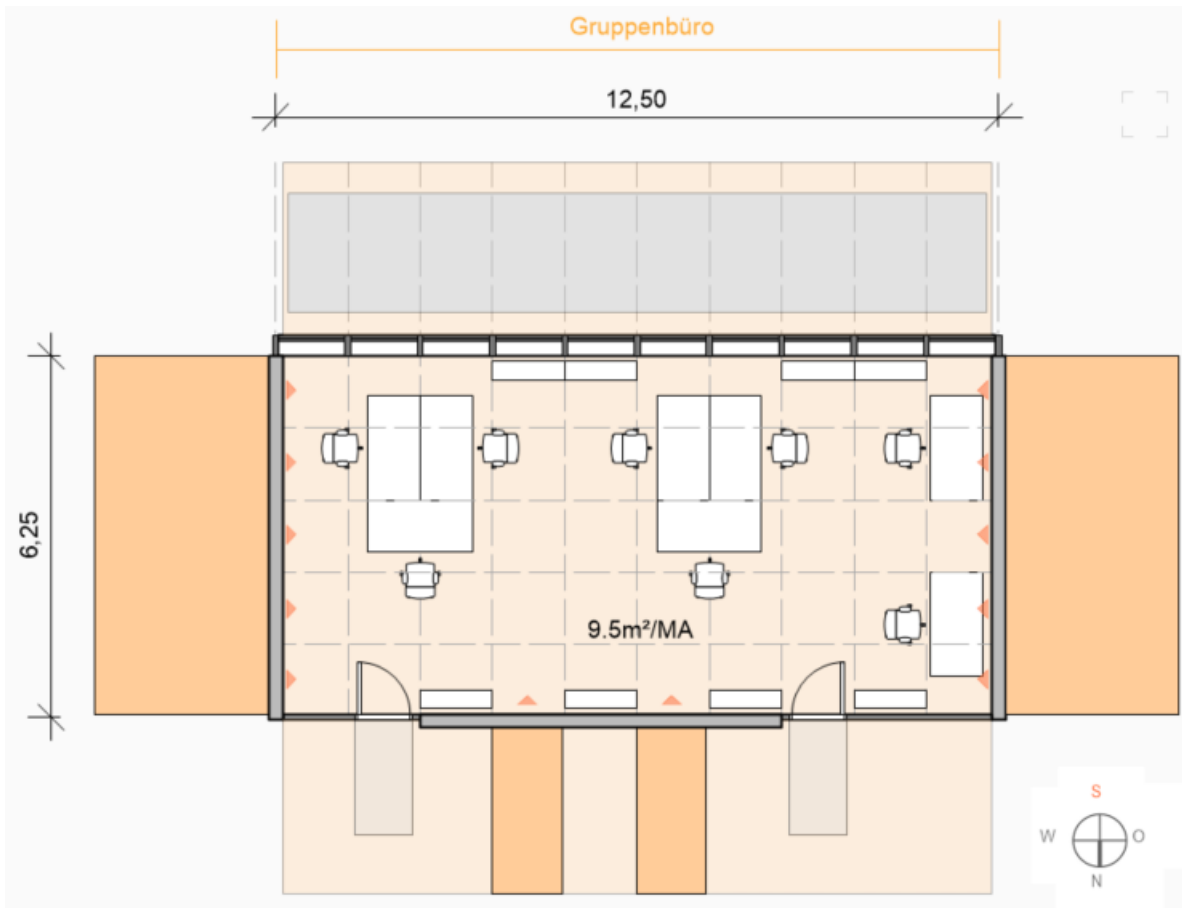


Abbildung 3.6: Gruppenbüro mit ca. 76 m² Grundfläche, vollverglaster Fassade mit außenliegendem Sonnenschutz, zwölf thermisch aktivierte Massivholzelemente

Zur Raumklimakonditionierung des einseitig vollverglasten Gruppenbüros werden insgesamt zwölf thermisch aktivierte Massivholzelemente benötigt.

3.2.4 Konzept auf Gebäudeebene

Dieser Abschnitt beschreibt die Überlegungen zum Einsatz der thermisch aktivierten Massivholzelemente im Kontext der Gebäudeenergieeffizienz. Bisherige Diskussionen zur energetischen Leistung des Systems fanden auf der Ebene der Nutzenergie⁹ statt. Dem entspricht der in Abbildung 3.7 gezeigte, hellbraun gestrichelte Rahmen. Innerhalb der Bilanzgrenze der Nutzenergie werden die für das thermische Raumklima maßgebenden Wärmeflüsse bilanziert. Dazu gehören auf der einen Seite die Wärmeverluste durch Transmission (Q_T) und Konvektion (Q_V) und auf der anderen Seite die Wärmegewinne. Bei den Gewinnen wird unterschieden zwischen den passiven Gewinnen, wie die eindringende Solarstrahlung (Q_S) sowie internen Wärmequellen (Q_I) und aktiven Gewinnen durch das Heizungssystem (Q_{OUT}). Die Aufgabe der Raumtemperaturregelung ist es, die vom Heizsystem abgegebene Leistung (Q_{out}) so zu stellen, dass sie die Verluste abzüglich der solaren und internen Gewinne ausgleicht und die Raumtemperatur auf dem gewünschten Niveau hält.

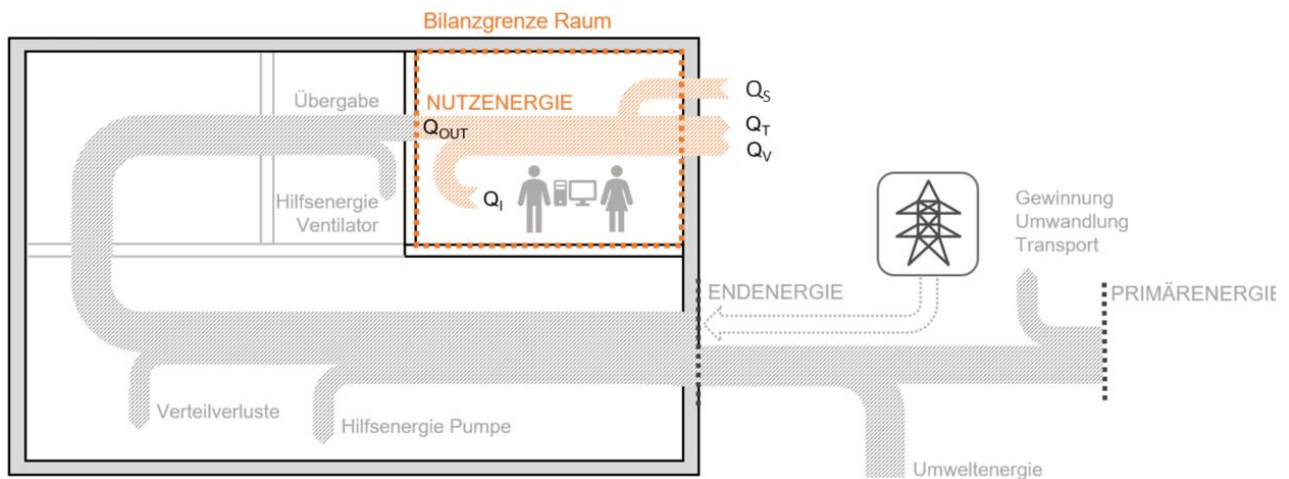


Abbildung 3.7: Energieflussdiagramm mit farblicher Kennzeichnung der Bilanzgrenze der Analyse; in Anlehnung an (Vitopoulou 2018)

Die Funktion der thermisch aktivierten Massivholzelemente ist die Übergabe der Nutzenergie in Form von Wärme- oder Kälteleistung an den Raum. Im Energieflussbild eines Gebäudes bilden sie die Schnittstelle der oben gezeigten Nutzenergiebilanzgrenze zur Gebäudeenergieversorgung.

⁹ Die Nutzenergie ist die Energie, die dem Nutzer eines Gebäudes für seine Bedürfnisse unmittelbar zur Verfügung steht. Beispiele sind die von einem Heiz- oder Kühlsystem am Bestimmungsort abgegebene Wärme bzw. Kälte. Die Bilanzgrenze der Nutzenergie ist, wie in der Abbildung 3.7 durch den hellbraun gestrichelten Rahmen angedeutet, der Raum bzw. die thermische Zone.

Außerhalb der Bilanzgrenze der Nutzenergie werden alle Energieflüsse bilanziert, die innerhalb des Gebäudes zur Übergabe der Nutzenergie (Q_{out}) am Bestimmungsort aufgewendet werden müssen. Im Fall von luftführenden, thermisch aktivierten Massivholzelementen mit dezentraler Luftkonditionierungseinheit treten ferner Hilfsenergieströme auf, die für den Betrieb des Ventilators angerechnet werden müssen. In der Abbildung ist der Hilfsenergiestrom des Ventilators grau dargestellt. Die Bilanzierung dieses Hilfsenergiestromes richtet sich danach, ob sich das thermisch aktivierte Massivholzelement im Heiz- oder im Kühlbetrieb befindet. Die vom Ventilator aufgenommene elektrische Leistung wird innerhalb des geschlossenen Systemluftkreislaufes vollständig in Wärme umgewandelt. Diese Wärme kann im Heizbetrieb in den Nutzenergiefluss eingerechnet werden. Im Kühlbetrieb jedoch ist die Erwärmung der Systemluft unerwünscht und muss von der Nutzenergie abgezogen werden, bzw. durch eine erhöhte Kälteleistung durch das Versorgungssystem ausgeglichen werden. Insbesondere für einen energieeffizienten Kühlbetrieb ist daher eine aerodynamische Optimierung zur Reduzierung der Druckverluste in den Luftströmungswegen des Elements erforderlich. Im Verlauf des grau gekennzeichneten Energieflusses sind weitere Aufwendungen, wie die dargestellten Verteilverluste und die Hilfsenergie für die Zirkulationspumpen des wasserführenden Systems zu berücksichtigen. Bei Vorhandensein von Schichtenspeichern, Feuerungsanlagen oder sonstigen Armaturen in der Heizungsanlage sind deren Wärmeverluste und Hilfsenergieaufwendungen ebenfalls zu berücksichtigen. Die Außenhülle des Gebäudes stellt die Bilanzgrenze der Endenergie dar. Darin enthalten ist die Nutzenergie zuzüglich aller Energieströme der Anlagentechnik im Gebäude. Die am Gebäudeübergabepunkt von der öffentlichen Versorgung entnommene Energie wird als Endenergie bezeichnet. Dabei handelt es sich beispielsweise um die elektrische Energie aus dem Versorgungsnetz oder die am Gebäude angelieferten Brennstoffe. Durch Multiplikation der Endenergiemenge mit dem jeweiligen Primärenergiefaktor¹⁰ des Energieträgers erhält man die Primärenergiemenge. Diese sagt aus, welches Treibhauspotenzial von der vom Gebäude verbrauchten nicht erneuerbaren Energie ausgeht.

Neben den hier beschriebenen Ausführungen der thermisch aktivierten Massivholzelemente sind viele weitere Anwendungsszenarien denkbar. Beispielsweise könnten die Elemente direkt an ein Luftkanalnetz angeschlossen werden. In diesem Fall würden die dezentralen Luftkonditionierungseinheiten entfallen. Die Luftkonditionierung könnte für die Anwendung eines winterlichen Frostschutzes an Berghütten in Brettsperrholzbauweise durch Solarenergie mittels vertikaler Solarluftkollektoren an der Außenfassade erfolgen. Ein weiterer denkbarer Einsatz in Regionen mit hohem Kühlenergiebedarf tagsüber und hohen Tag-Nacht-Lufttemperaturdifferenzen wäre wie folgt beschrieben. Die thermische Aktivierung kann dazu genutzt werden, um in der Nacht kühle Außenluft durch die Elemente zirkulieren zu lassen, um diese für den Folgetag vorzukühlen.

¹⁰ Der Primärenergiefaktor sagt aus, welche nicht erneuerbare Energiemenge insgesamt außerhalb der Systemgrenze der Endenergie aufgewendet werden musste, um die Endenergie an dieser Systemgrenze bereit zu stellen.

So können diese deutlich mehr Wärme tagsüber aufnehmen und die Überhitzung der Räume tagsüber effektiv abdämpfen.

3.3 Entwicklungsparameter

3.3.1 Allgemein

Das Ziel dieses Abschnittes ist die Planung der Produktion von prototypischen Probekörpern für die experimentelle Untersuchung. Aus organisatorischen Gründen finden die Planung und der Bau von Probekörpern zu einem frühen Stadium der Entwicklung statt. Gründe hierfür sind die notwendige Zeit für die Durchführung von Langzeitlaborversuchen und die Gegebenheiten der Auslastung der industriellen Produktionsanlagen des herstellenden Betriebes.

Aufbauend auf den zuvor getroffenen Festlegungen zur allgemein für Flächenheiz- und Kühlsysteme geltenden sinnvollen Szenarien-Eingrenzung, werden in den folgenden Kapiteln spezielle, für die thermische Aktivierung von Massivholzbauteilen geltende Spezifikationen erarbeitet. Zunächst werden Entwicklungsparameter und -varianten definiert, die dann auf wenige herzustellende Konfigurationen bestimmt werden. Die Produktionsanzahl richtet sich auf der einen Seite nach der vermuteten Streuung der Messergebnisse und auf der anderen Seite nach den praktikablen Gegebenheiten und den zur Verfügung stehenden Ressourcen des Herstellungsbetriebes sowie der Laboreinrichtung.

3.3.2 Überblick und Eingrenzung der Variationen

Die ersten prototypischen Probekörper thermisch aktivierter Massivholzelemente werden unter Berücksichtigung der folgenden Prämissen entworfen:

- anlagentechnische Erschließbarkeit des Elements in der späteren Einbausituation,
- planmäßige Holzfeuchtezustände im Heiz- und Kühlbetrieb und daraus resultierende Quell- und Schwindverformungen,
- Ausschluss kritischer Holzfeuchtezustände, insbesondere im Kühlbetrieb, und daraus resultierende holzschädigende Mechanismen,
- Wahl des Wärmeüberträgermediums,
- Robustheit gegen Beschädigungen im Nutzbetrieb,
- maximierte Heiz- und Kühlleistung,
- Sicherstellung thermisch behaglichen Raumklimas im Heiz- und im Kühlbetrieb,
- Gleichmäßigkeit der thermischen Leistungsdichte an der Oberfläche,
- minimierte notwendige Temperaturspreizung zwischen Wärmeüberträger und Oberfläche,
- Minimierte Strömungsverluste im Element und dadurch minimierter Hilfsenergieaufwand,
- praktische Überlegungen zum Ablauf des Herstellungsprozesses,
- praktische Überlegungen zum Ablauf der Montage auf der Baustelle,
- stoffliche Wieder- und Weiterverwendbarkeit der Elemente nach der Nutzungsphase.

Als nächstes soll die Wahl des Wärmeüberträgermediums getroffen und die Anzahl konstruktiver Varianten weiter reduziert werden.

Unter Abwägung dieser Punkte und unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Ressourcen, wurden ein sicherheitsorientierter und ein leistungsorientierter Prototyp entwickelt, gebaut und im Labor getestet.

Zur Reduzierung der möglichen Varianten wird beginnend festgelegt, dass die ersten Prototypen Wandelemente darstellen sollen. Diese können sowohl für den Heiz- als auch für den Kühlbetrieb effektiv eingesetzt werden. Darüber hinaus erfordert die Integration des Heiz- und Kühlsystems in die Massivholzelemente ein hohes Maß an Standardisierung der Elementgrößen.

Die Abmessungen des Versuchsaufbaus wurden so gewählt, dass die Versuchskörper praxisüblichen Wandelementen entsprechen. Die Anwendung als Decken- oder Bodenelement soll aufgrund der zuvor getroffenen Festlegungen in diesem Projekt nicht betrachtet werden.

3.3.3 Wahl des Wärmeüberträgermediums

Eine der auswirkungsreichsten Festlegungen bei der Entwicklung der thermisch aktivierten Massivholzelemente, betrifft die Wahl des Wärmeüberträgermediums. Es werden der Einsatz eines luft- und eines wasserführenden Systems diskutiert. Die Festlegung des Mediums soll in einem zweistufigen Verfahren getroffen werden. Beginnend werden Vor- und Nachteile beider Systeme gesammelt und anschließend in einer Bewertungsmatrix gegenübergestellt.

In den folgenden zwei Tabellen werden die wichtigsten Vor- und Nachteile der beiden Medien aufgezählt.

Tabelle 3-1: Vor- und Nachteile einer luftführenden Bauteilaktivierung

Luftführendes System – Vorteile	Luftführendes System – Nachteile
keine Gefahr von Wasserschäden bei Leckagen	Geringere volumenbezogene Wärmespeicherfähigkeit der Luft
Kein Kanal- oder Rohrmaterial erforderlich	Deutlich höherer Zirkulationsenergieaufwand für das kompressible Medium Luft
Sehr gute Recyclbarkeit der Elemente, da kein Rohrmaterial in das Holz geklebt wird	Zusätzlicher Wasser-Luft-Wärmetauscher und Gebläse am Element erforderlich
Überwachung und Regelung der Holzfeuchte durch die Systemluftzustände möglich	Teilweise unerwünschte Feuchtewechselwirkung zwischen Systemluft und Holz
Besserer Wärmeübergang vom Medium zum Holz	Höhere Temperaturspreizung zwischen gewünschter Oberflächentemperatur und Wärmeüberträgermedium erforderlich
Geringer Herstellungsaufwand durch einfachere Kanalgeometrie, höhere Toleranzen und fehlende weitere Einbauten	Größere Schleifenanzahl erforderlich aufgrund der geringen Speicherfähigkeit der Luft
Kanäle u. U. auch für nachträgliche Installationen nutzbar	Hohlräume im Holz können sich nachteilig auf den Brandschutz auswirken

Tabelle 3-2: Vor- und Nachteile einer wassergeführten Bauteilaktivierung

Wassergeführtes System – Vorteile	Wassergeführtes System – Nachteile
Das Wärmeübergabesystem kann direkt an das Verteilnetz der Gebäudes angeschlossen werden	Gefahr von Wasserschäden z. B. nach dem Einschlagen eines Nagels
Geringere Temperaturspreizung zwischen gewünschter Oberflächentemperatur und Wärmeüberträgermedium aufgrund der hohen Wärmespeicherfähigkeit von Wasser	Der Einbau des Rohrsystems erfordert deutlich höhere Präzision und erweiterte Kompetenzen bei der Produktion des Brettsperrholzes
Geringer Zirkulationsenergieaufwand für das inkompressible Medium Wasser	Einbuße der Materialreinheit durch das Einkleben des Rohrmaterials
Keine hygrische Wechselwirkung zwischen Medium und Holz	Schlechterer Wärmeübergang vom Medium auf das Holzelement (Schwachstelle ist die Verbindung zwischen Rohrmantel und Holz)
Nicht vorhandene Hohlräume im Element wirken sich positiv auf den Brandschutz aus	Keine Überwachung der Holzfeuchte über das Wärmeüberträgermedium möglich
Einfache hydraulische Anbindung an das Versorgungssystem	Bei nicht ganzjährig betriebenen Gebäuden besteht die Gefahr von Frostschäden und daraus folgend Wasserschäden

Nach der Sammlung der Aspekte werden diese in einer Bewertungsmatrix gegenübergestellt.

Tabelle 3-3: Bewertungsmatrix zur Wahl des Wärmeüberträgermediums

Aspekt		Wärmeüberträgermedium	
		Luft	Wasser
Herstellung	Fräsen der Kanäle	+/o	-
	Einbringen von Rohmaterial	++	--
	Verkleben der Elemente	-	+
	Herstellungsaufwand insgesamt	o	--
Montage	Erschließbarkeit	o	+
	Schnittstelle/Anschluss	--	+
	Montageaufwand Baustelle	-	+
Betrieb	Robustheit	+	--
	Komfort	++	++
	Systemleistung	o	o
	Energieeffizienz	+/o	+
	Ressourceneffizienz	++	--
	Rückbau/Trennbarkeit	++	--

++ sehr gut (6 P) + gut (4 P) o durchschnittlich (3 P) - schlecht (1 P) -- sehr schlecht (0 P)

Mit der oben aufgeführten Punktebewertung ergibt sich: Luft (46 P) zu Wasser (30 P).

Bei den getroffenen Bewertungen in Tabelle 3-3 und den folgenden Erläuterungen handelt es sich um baupraktische Einschätzungen. Diese sind das Ergebnis der Überlegungen und Diskussionen im Vorfeld der Produktionsplanung. Zur Nachvollziehbarkeit der Einschätzungen sollen die bewerteten Aspekte wie folgt erläutert werden.

Fräsen der Kanäle

In der Komplexität der zu fräsenden Geometrien erweisen sich rechteckig angeordnete Kanäle mit jeweils rechteckigem Querschnitt als vorteilhaft gegenüber Rundquerschnitten, die in der Ebene freiförmig verlaufen. Gerade verlaufende, rechtwinklige Kanäle bieten ferner die Möglichkeit, mit Scheibennutfräsen zu arbeiten. Diese erlauben eine deutlich höhere Fräsgeschwindigkeit und geringere Rauigkeiten der Materialoberfläche als die freiformfähigen Fingernutfräser mit Vollradiusfräsbit. Die Fräsnuten der Rohre sind auf Presspassung zu fertigen, um den Wärmeübertrag zwischen Rohrwandung und Holzelement zu optimieren. Alternativ könnte der Einsatz von hochwärmeleitendem Kleber die erforderliche Einbautoleranz verringern. Aufgrund deren wesentlich einfacheren Geometrien und geringeren Genauigkeitsanforderungen an den Fräsprozess erhalten die Luftkanäle eine bessere Bewertung.

Einbringen der Rohre

Das Einbringen der Rohre ist nur beim wasserführenden System erforderlich. Die Rohre werden beklebt und in einen der beiden spiegelsymmetrisch gefrästen Halbschalenmäander gepresst. Die Anschlüsse der Rohre müssen im Stirnbereich der Elemente nach außen geführt werden, um ein flächiges Verpressen der Elemente zu ermöglichen. Eine Alternative zu herausstehenden Leitungsanschlüssen könnten Ebenen-gleiche Anschlussverschraubungen sein. Die Position der Anschlüsse muss auf die spätere Anbindung an das Versorgungssystem des Gebäudes abgestimmt sein. Vor dem Verschließen der Elemente ist eine Druckdichtigkeitsprüfung der Rohre durchzuführen. Hier werden neben den CNC-Fachkompetenzen auch haustechnische Kompetenzen in der Brettsperrholzproduktion benötigt. Aus dem zusätzlichen Integrationsaufwand resultiert eine negative Bewertung des wassergeführten Systems.

Verkleben der Elemente

Beim Verkleben der Elemente ist bei den Luftkanälen ein erhöhter Aufwand zu erwarten, da sicherzustellen ist, dass kein Kleber in die ausgefrästen Luftkanäle gerät und dort beim Aushärten zu leistungsreduzierenden Querschnittsverjüngungen führt.

Herstellungsaufwand insgesamt

In der Gesamtbewertung des Herstellungsprozesses ist beim wasserführenden System ein höherer Aufwand zu erwarten. Neben der reinen Holzverarbeitenden Kompetenz muss auch das Verlegen der Rohre im Element koordiniert und qualitativ überwacht werden. Die Geometrien der spiegelsymmetrischen passgenauen Rohrschalen erfordern erhöhte Präzisionsanforderungen. Einen weiteren vermuteten Mehraufwand der Rohrsysteme bedingen die Anschlusspunkte am Element während der Lagerung in der Brettsperrholzpresse sowie beim Transport.

Erschließbarkeit

Bei der Erschließbarkeit auf der Baustelle wird das wasserführende System besser bewertet, da die hydraulischen Anschlüsse wartungsfrei sind und bei deren Positionierung nicht auf eine dauerhafte Zugänglichkeit geachtet werden muss. Für das luftführende System ist gegenüber dem wasserführenden System ein größerer Anschlussraum erforderlich.

Schnittstelle / Anschluss

Der Anschluss des luftführenden Systems erfordert eine Konditionierungseinheit für den geschlossenen Systemluftkreislauf inkl. Gebläse und Wasser-Luft-Wärmetauscher. Das Gebläse erfordert neben dem hydraulischen auch einen elektrischen Anschluss und muss für Revisionen dauerhaft zugänglich sein. Dieser anlagentechnische Mehraufwand wird negativ bewertet.

Montageaufwand Baustelle

Wie zuvor beschrieben, erfordert das luftführende System eine Konditionierungseinheit in Form einer Bodeneinbaukassette am Erschließungspunkt des Elementes. Nachteilig wird der Abstimmungsaufwand mit dem Fußbodenaufbaugewerk gesehen. Neben dem hydraulischen Anschluss ist ein elektrischer Anschluss für das Gebläse beim luftgeführten System erforderlich. Daher wird der Montageaufwand des wassergeführten Systems positiv bewertet.

Robustheit

Ein großes Risiko liegt in den, im Massivholzelement verlaufenden, Wasserleitungen. Sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Beschädigung während der Nutzungsphase als auch der resultierende Schaden wird bei dem wasserführenden System kritisch gesehen. Eine nachträgliche Reparatur einer beschädigten Rohrleitung im Brettsperrholzelement ist mit hohem Aufwand verbunden und würde bei Elementen mit Sichtholzoberflächen voraussichtlich den Austausch des Wandelements erfordern. Schwindrisse an den Oberflächen der Elemente müssen sowohl beim luftgeführten als auch beim wassergeführten System während des Heizbetriebs planmäßig berücksichtigt werden. Auch wenn kurzzeitige Feuchtelasten durch das Holz aufgenommen werden können, ist im Kühlbetrieb eine Abkühlung der Elemente bis auf die Taupunkttemperatur regelungstechnisch auszuschließen. Letzteres trifft für sämtliche Flächenkühlssysteme zu und ist seit 30 Jahren Stand der Technik.

Komfort

Die thermische Aktivierung der Massivholzelemente wird als überdurchschnittlich behagliche Raumtemperaturkonditionierung angesehen. Insbesondere die Nutzung von Wandelementen zur Raumbeheizung stellt bei gut gedämmten Gebäuden die behaglichste Art im Vergleich der Flächenheiz- und Kühlssysteme dar. Dies gilt unter der Prämisse, dass die Regelung des Systems eine kritische Strahlungstemperatur-Asymmetrie vermeidet.

Systemleistung

Die thermische Leistung ist im Wesentlichen abhängig von der Vorlauftemperatur des Wärmeüberträgermediums, der Überdeckung der aktivierenden Schicht, dem Abstand der Kanäle zueinander sowie der rückwärtigen Dämmung des Wandelements. Die thermische Leistung des Systems im Vergleich mit üblichen Wandtemperierungssystemen ist, unabhängig vom Wärmeüberträgermedium, ca. ein Drittel niedriger. In Kapitel 6 wird näher auf die Leistungsbeschreibung eingegangen. Wasser- und luftführendes System erhalten eine ausreichende Bewertung.

Energieeffizienz

Sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb können beide Systeme mit moderaten Vorlauftemperaturen nahe der Raumsolltemperatur betrieben werden. Dies erhöht den Ausnutzungsgrad von erneuerbaren Wärmequellen und –senken sowie den Leistungsfaktor von Wärmepumpen. Die Energieeffizienz beider Systeme wird positiv bewertet. Einen Abstrich in dieser Kategorie erhält das luftführende System aufgrund der erforderlichen Hilfsenergie für den Ventilator. Die Zirkulation des kompressiblen Mediums Luft ist deutlich energieintensiver als die Zirkulation von Wasser um die gleiche Wärmemenge zu transportieren.

Ressourceneffizienz

Die Ressourceneffizienz beider Systeme kann aufgrund der Verwendung des nachwachsenden Rohstoffs Holz als positiv bewertet werden. Ein zusätzliches Heiz- oder Kühlsystem wird in vielen Anwendungen entbehrlich. Durch das Einbringen der Rohrleitungen in das Massivholzelement verliert dieses seine stoffliche Reinheit, weshalb unter diesem Aspekt dem wassergeführten System Abstriche in der Bewertung gemacht werden.

Rückbau/Trennbarkeit

Mit Blick auf die Wiederverwendbarkeit der verbauten Stoffe wird das wassergeführte System als verklebtes Kompositmaterial negativ bewertet.

Wahl des Wärmeüberträgermediums

Die Festlegung auf ein Wärmeüberträgermedium stellt sich als ein komplexer Entscheidungsprozess dar. Viele der oben aufgeführten Aspekte überlagern oder beeinflussen sich wechselseitig. Die getroffene Punktbewertung zu Gunsten des Wärmeüberträgers Luft kann dabei zunächst ein Anhaltspunkt sein. Im Rahmen einer Expertenrunde im Dezember 2016 wurde definiert, dass dem Aspekt der Robustheit die höchste Priorität zugestanden werden soll. Unter diesem Aspekt bestätigte sich das Ergebnis der Punktbewertung nach Tabelle 3-3.

Entscheidung: Unter Abwägung der zuvor diskutierten Aspekte wird folglich entschieden, dass die Entwicklung der thermisch aktivierten Massivholzelemente auf der Basis eines luftführenden Wärmeübertragungssystems erfolgen soll.

Diese Entscheidung ermöglicht die für den Prototypbau erforderliche Reduzierung von Varianten. Trotz dieser Festlegung wird in vielen Entwicklungsschritten, wie bei der Modellierung, die Möglichkeit einer wasserführenden thermischen Aktivierung beibehalten.

Zwischenfazit: Auf den bisherigen Erkenntnissen und Diskussionsergebnissen aufbauend könnte ein über den Prototypbau hinausgehendes allgemeingültiges Zwischenfazit zur Wahl des Wärmeüberträgermediums gezogen werden. Es lautet wie folgt: Wenn bei einem Projekt die Holzoberflächen der Brettsperrholzelemente auf Bauherrenwunsch sichtbar bleiben sollen, dann kann bis auf weiteres der Einsatz von Brettsperrholzelementen mit integrierter luftführender thermischer Aktivierung empfohlen werden. Sofern eine Kapselung des Bauteils aus Brandschutz-, Schallschutz- oder sonstigen Gründen erforderlich ist, könnte ein marktübliches, wasserführendes System zweckmäßig sein, welches in die Kapselung integriert ist, bzw. hinter dieser angebracht ist.

3.3.4 Arrangement der Luftkanäle

Vorteile und Nachteile unterschiedlicher Luft-Kanalarrangements sollen anhand der folgenden Schemata erläutert werden. Dabei wird zunächst auf grundsätzlich unterschiedliche Verschaltungsprinzipien der Kanäle und der Erschließung der Elemente eingegangen. Im Weiteren werden die Lagetiefe der Kanäle, deren Querschnitt und die Strömungsweglänge diskutiert.

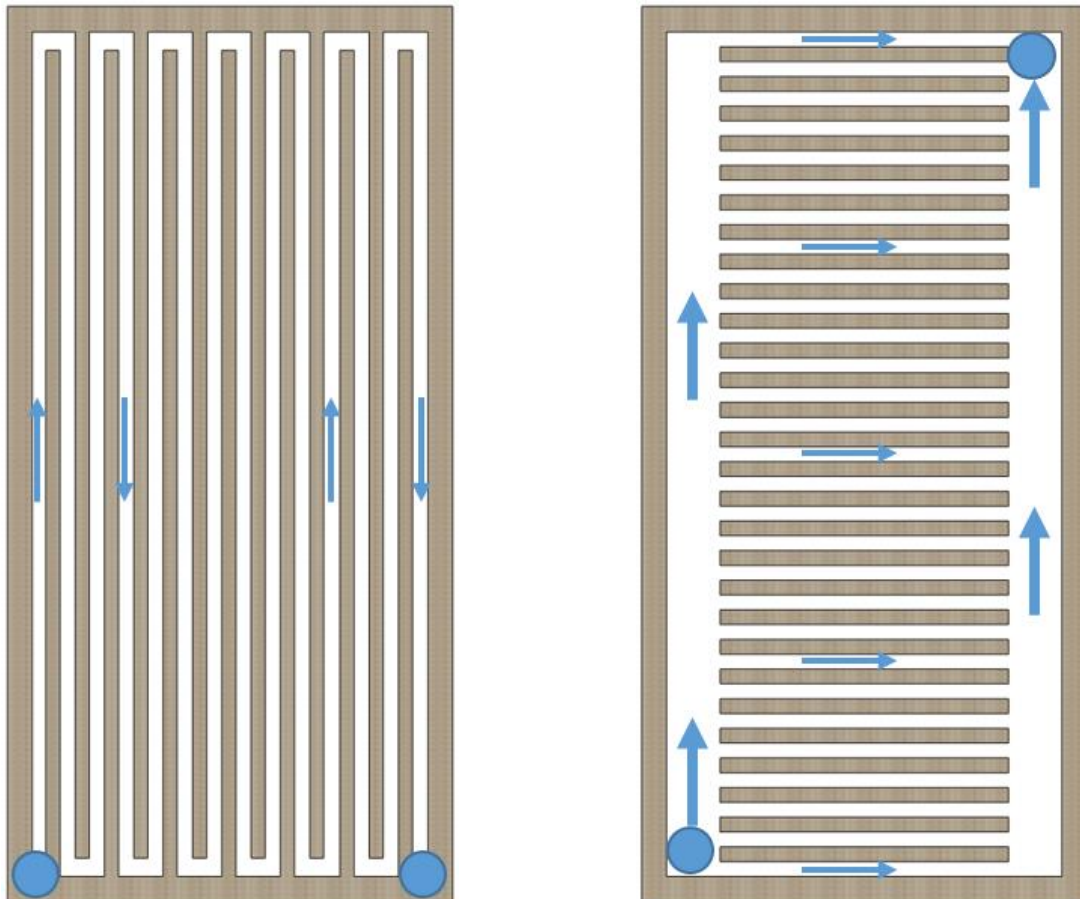


Abbildung 3.8: links: Mäanderförmige Serien-Schaltung der Kanäle mit einseitiger Erschließung im Sockelbereich; rechts: Harfenförmige Parallel-Schaltung mit diagonaler Erschließung, horizontale Einzelkanäle

Die Abbildung 3.8 links zeigt ein mäanderförmiges Kanalarangement wie es z. B. bei Wasserrohren in Fußbodenheizungen üblich ist. Aus dieser seriellen Verschaltung der Kanäle ergibt sich die größte Strömungsweglänge. Aufgrund der geringen Wärmespeicherefähigkeit der Luft wird deren Temperaturüberhöhung schon nach wenigen Metern abgebaut, sodass stets nur ein Teil der Elementfläche thermisch aktiviert würde. Diese Variante wird für den Wärmeüberträger Luft nicht weiter betrachtet. Das rechte Schema zeigt ein Arrangement, in dem alle Einzelkanäle parallel durchströmt werden. Durch die diagonal entgegengesetzte Anordnung der Ein- und der Ausströmöffnung befinden sich alle Kanäle im hydraulisch abgeglichenen Zustand zueinander, da der Strömungsweg über sämtliche Pfade exakt gleich lang ist.

Einzig der aufwärts gerichtete Impuls der einströmenden Luft bewirkt, dass die unteren Kanäle etwas weniger stark durchströmt werden als die oberen. Der große Nachteil dieser Variante ist die Erschließbarkeit. Ein Versorgungskanalanschluss an der oberen Position lässt sich in der üblichen Praxis voraussichtlich kaum realisieren.

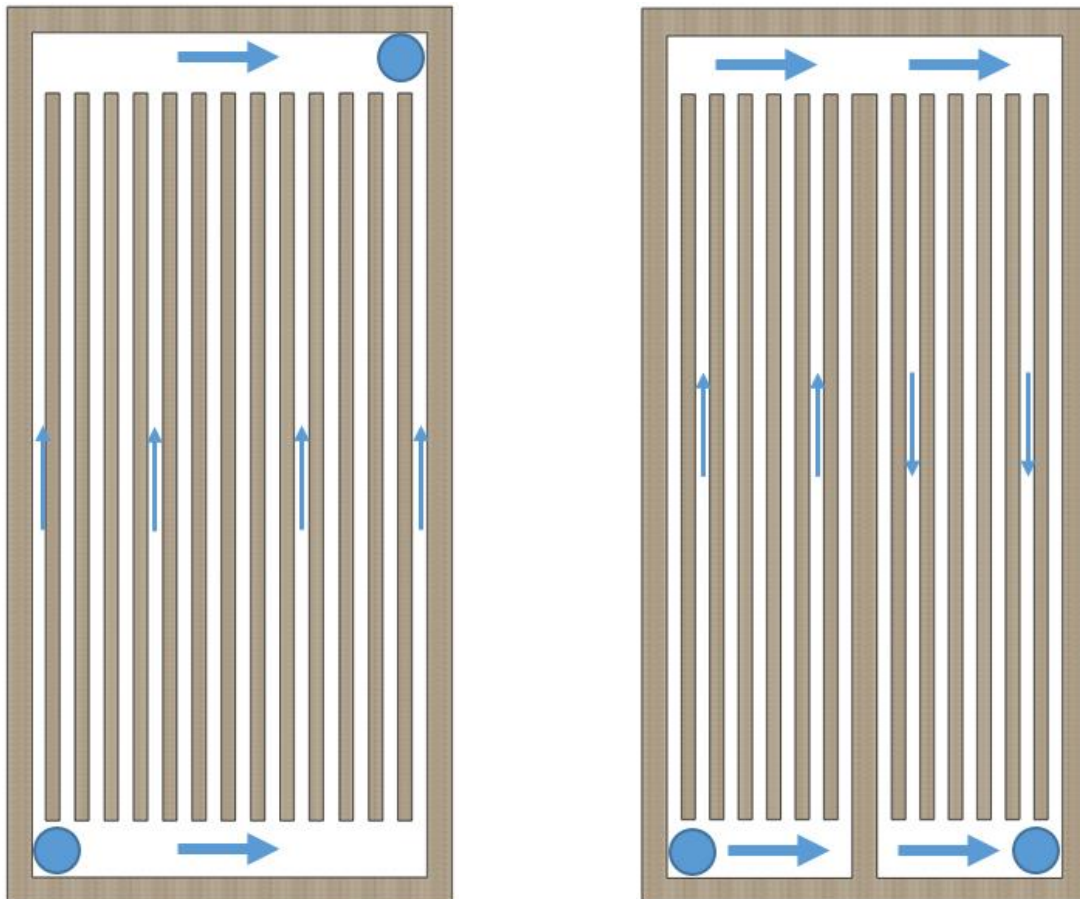


Abbildung 3.9: links: Harfenförmige Parallelschaltung mit diagonaler Erschließung, vertikale Einzelkanäle; rechts: Harfenförmige Serien-Parallelschaltung mit Erschließung im Sockelbereich, vertikale Einzelkanäle

Ähnlich ist die links in Abbildung 3.9 gezeigte Variante zu bewerten. Die Strömungspfade der Systemluft sind optimal kurz. Problematisch ist wieder die Erschließungsposition der Ausströmöffnung. Ein optimierter Kompromiss ist die rechts in der Abbildung dargestellte Variante. Auch hier befinden sich sämtliche Strömungspfade im hydraulischen Abgleich zueinander. Die Strömungswege sind mit ca. der zweifachen Elementhöhe plus der einfachen Elementbreite länger als die der diagonalen Varianten. Beide Anschlüsse der Elementerschließung befinden sich auf der unteren Seite. Dadurch kann die Luftkonditionierungseinheit im Fußbodenaufbau untergebracht werden.

Entscheidung: Die in Abbildung 3.9 rechts dargestellte Variante 'Harfenförmige Serien-Parallelschaltung' wird als realistisch umsetzbar angesehen und in den folgenden Kapiteln als Grundlage der Entwicklung genutzt.

3.3.5 Lagetiefe der Luftkanäle

Das zu entwickelnde System sollte zum einen eine möglichst hohe spezifische Heiz- und Kühlleistung aufweisen und auf der anderen Seite robust sein. Die thermische Leistung der Flächenheizung ist insbesondere abhängig von der Überdeckung der aktiven Schicht sowie von der Vorlauf-temperatur. Die Vorlauf-temperaturüberhöhung gegenüber der gewünschten Oberflächentemperatur sollte möglichst gering sein, um mit moderaten Vorlauf-temperaturen einen möglichst hohen Ausnutzungsgrad von erneuerbaren Energiequellen zu ermöglichen. Beispielsweise kann bei einer zum Heizen notwendigen Vorlauf-temperatur von 30 °C eine Wärmepumpe noch sehr effizient betrieben werden. Steigt die notwendige Vorlauf-temperatur auf über 55 °C an, wird die Leistungszahl der Wärmepumpe zunehmend schlechter.

Im Sinne der Energieeffizienz ist eine möglichst geringe notwendige Temperaturüberhöhung erstrebenswert. Je dicker die Holzschicht zwischen Raum und aktivierender Schicht, desto größer ist die notwendige Temperaturüberhöhung. Allerdings tritt bei geringer werdender Holzüberdeckung der Aspekt der Systemdichtheit in den Vordergrund. Um eine Luftdichtheit zwischen Systemluft und Raumluft herzustellen, sollten mindestens eine ungestörte, schmalseitenverklebte Brett-lamellenschicht und eine ungestörte Klebefläche zwischen der luftführenden Schicht und der Raumoberfläche vorhanden sein.

Der Schichtenaufbau des hier untersuchten Brettsperrholz-Standardproduktes beginnt mit einer vertikalen, schmalseitenverklebten Deckschicht. Die zweite Schicht ist horizontal ausgerichtet und standardmäßig nicht schmalseitenverklebt. Die dritte Schicht ist wieder vertikal ausgerichtet. Bei der Positionierung der luftführenden Schicht stellt sich die Frage, ob diese in die dritte oder in die zweite Schicht integriert werden kann. Bezüglich der Systemleistung und der Energieeffizienz sollte die Schicht zwei die geeignetere Lage sein. Auch für die statische Leistungsfähigkeit ist es vorteilhaft die Kanäle nicht in die normallastabtragenden vertikalen Schichten zu fräsen, sondern in die waagerechten Schichten. Fraglich ist, ob die verbleibende erste Schicht die raumseitige Luftdichtheit gewährleisten kann. Die konservativere Variante ist also, die luftführende Schicht in die dritte Brett-lamellenschicht zu integrieren. So wäre die Luftdichtheit durch die beiden Schichten eins und zwei sowie durch die dazwischenliegende ungestörte Kleberschicht gewährleistet.

Ausgehend von dem untersuchten Systemformat mit der Standardbreite von 1250 mm mit einem praxisüblichen fünfschichtigen Aufbau in der Stärke 100 mm ergibt sich für die beiden angedachten Varianten eine Holzüberdeckung von 20 bzw. 40 mm¹¹.

Durch Laborversuche soll überprüft werden, ob im laufenden Heizbetrieb Leckagen am Element oder andere unvorhergesehene Erscheinungen auftreten. Für die zwei angedachten Varianten werden jeweils ein Prototyp hergestellt:

- ein sicherheitsorientierte Prototyp A mit der aktiven Schicht in Lage 3 und
- ein leistungsorientierter Prototyp B mit der aktiven Schicht in Lage 2.



Abbildung 3.10: Prototyp A mit der luftführenden Schicht in Brettlamellenlage drei

¹¹ Mit der Gestaltung der Decklage bieten sich im Nachgang des Prototypbaus weitere Optimierungspotenziale. Beispielsweise könnte den raumseitigen Abschluss anstelle einer 20 mm schmalseitenverklebten, massiven Brettlage eine mehrschichtige, 10- 20 mm starke Multiplexplatte bieten.

Bei dem sicherheitsorientierten Prototypen A befinden sich die Luftkanäle in Schicht drei. Die Überdeckung beträgt durch die ersten beiden Schichten insgesamt 40 mm. Um die Stabilität des Schichtenaufbaus nicht unnötig zu schwächen in dem der verbleibende normalkraftabtragende Restquerschnitt in Schicht 3 eliminiert wird, werden die horizontalen Erschließungskanäle parallel der Brett lamellen in Schicht zwei integriert.

Beim leistungsorientierten Prototyp B befinden sich sämtliche Luftkanäle in der zweiten Schicht. Die Überdeckung der aktivierten Sicht ist mit 20 mm halb so stark wie bei Prototyp A.

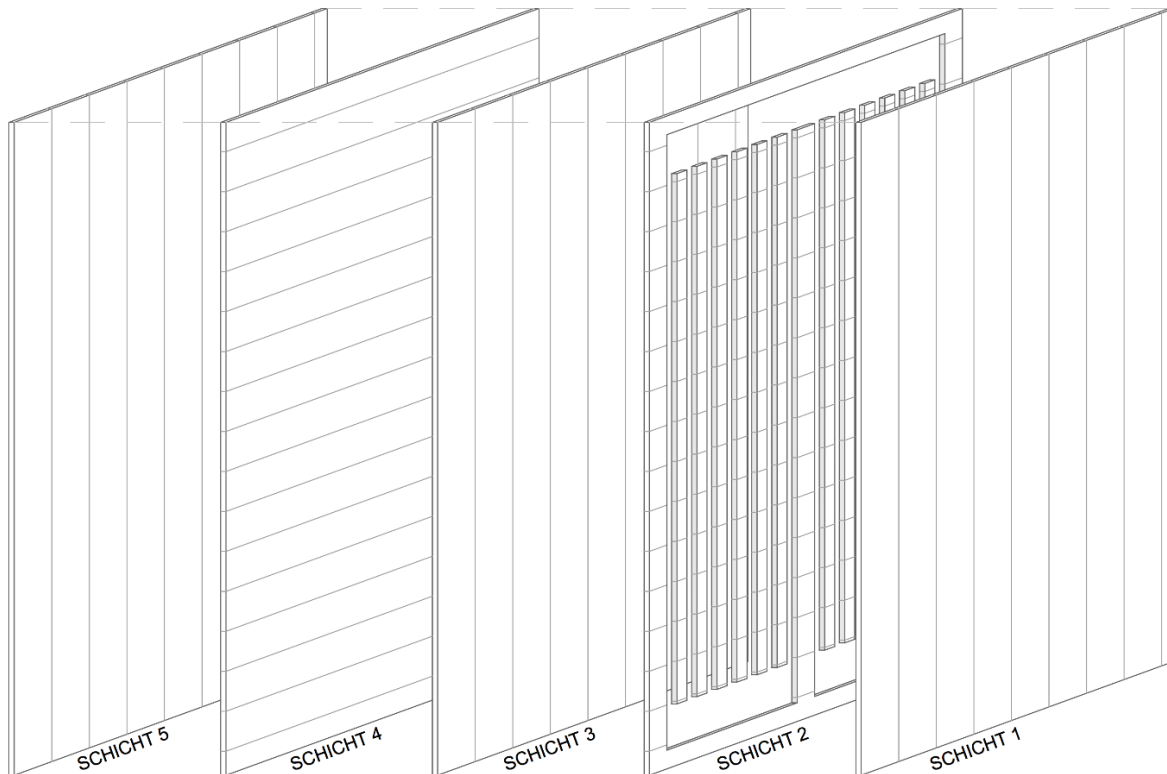


Abbildung 3.11: Prototyp B mit der luftführenden Schicht in Brett lamellenlage zwei

Durch die Laborversuche werden die Leistungsdaten beider Prototypen ermittelt und es soll geprüft werden, ob sich an der Elementoberfläche im Heizbetrieb Schwindrisse oder sonstige Beeinträchtigungen bilden.

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Produktion prototypischer Probekörper

4.1.1 Produktionskonzept

Mit dem Ziel einer schnellen Umsetzung der Ergebnisse dieser Arbeit in die Praxis, soll das entwickelte System eine hohe Kompatibilität mit den Produktionsanlagen der aktuellen Brettsperrholzherstellung aufweisen. Für eine Aussage zur Herstellbarkeit und Kompatibilität des Systems sollen die prototypischen Probekörper, wie bereits diskutiert, auf der Grundlage eines praxisüblichen, standardisierten Brettsperrholzproduktes konstruiert werden.

Möglichst ressourcensparend sollen zwei Versuchskörper auf der Grundlage des untersuchten Brettsperrholzstandardproduktes produziert werden. Daher wurden in einem Produktionsablauf zwei Prototypen eines üblichen Wandelements von je 1,25 x 2,45 m des fünfschichtigen Aufbaus hergestellt. Die Länge der zu verklebenden Elemente ergibt sich aus der Standardproduktionslänge der Elemente von fünf Metern. Abzüglich einer 10 mm Sägeblatffuge und einer 90 mm Materialproben-Überlänge an der Unterseite des Elements wird die verbleibende Restlänge genutzt um zwei Probekörper herzustellen. Die Breite aller Elemente beträgt 1,250 m, da dies ein übliches Achsmaß in standardisierten Gebäudegrundrissen ist und so ein geringerer Anpassungsbedarf bei der späteren Projektierung des Systems erwartet wird. Die zwei Prototypen A und B unterscheiden sich wie zuvor beschrieben in der Lage der Längskanäle.

Die Herstellung erfolgt in vier Schritten:

- 1a) Herstellung des vorderseitigen Halbelements aus den Schichten eins und zwei,
- 1b) Herstellung des rückseitigen Halbelements aus den Schichten drei, vier und fünf,
- 2) Fräsen der Kanäle in die beiden Halbelemente entsprechend der nachfolgenden Zeichnungen,
- 3) Kleberauftrag und Verpressen der beiden Halbelemente,
- 4) Zuschnitt der beiden prototypischen Probekörper A und B.

4.1.2 Bemaßung

In *Abbildung 4.1*: sind die beiden zwei- und fünfschichtigen Halbelemente dargestellt.

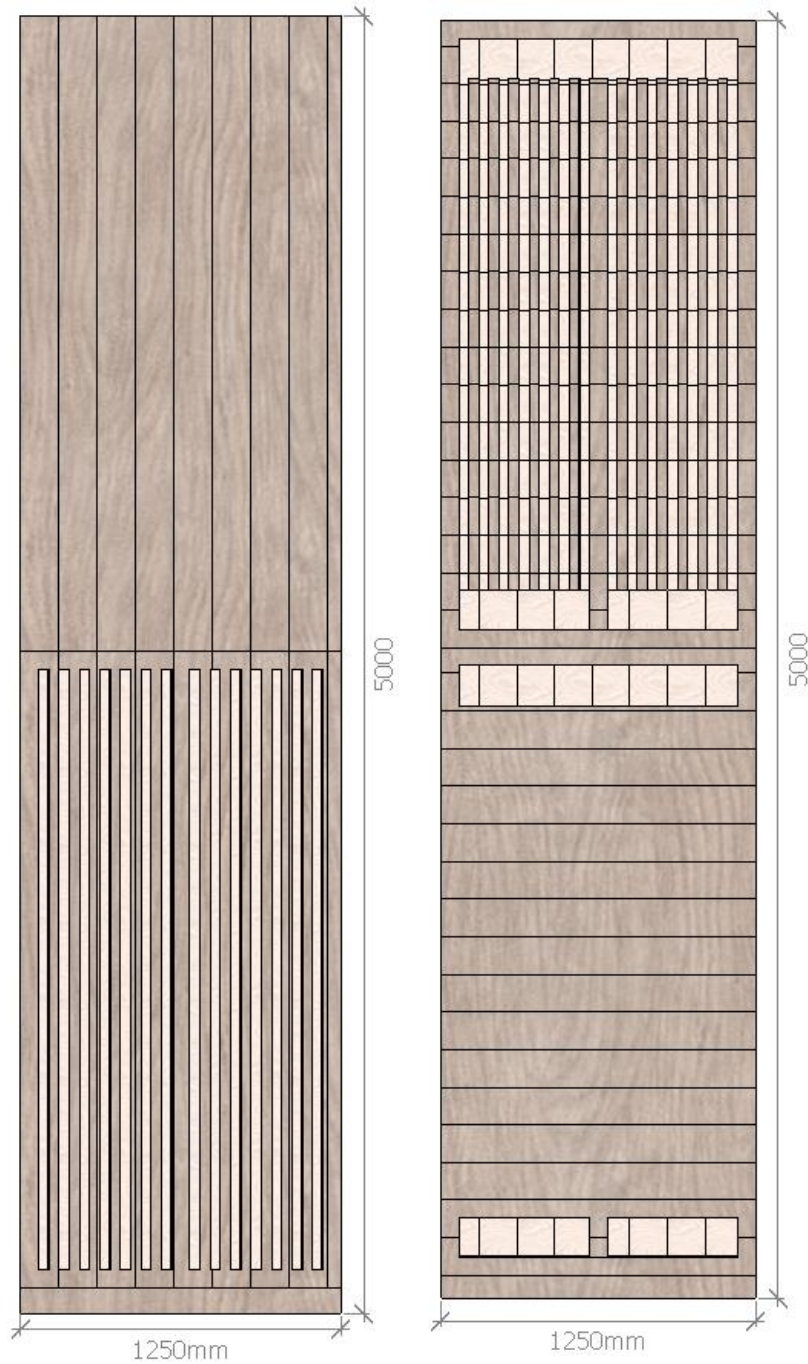


Abbildung 4.1: Links: rückseitiges Halbelement aus den Schichten 3, 4, 5; rechts: vorderseitiges Halbelement aus den Schichten 1, 2

Bei der Verklebung sollen die in *Abbildung 4.1* gezeigten, offenen Seiten mit Kleber benetzt und später zusammengeklappt werden. Nach dem Verpressen und Aushärten der Halbelemente sollen diese entlang der mittleren Querfuge in die Prototypen A (unten) und B (oben) zersägt werden.

Die detaillierte Bemaßung kann *Abbildung 4.2* entnommen werden.

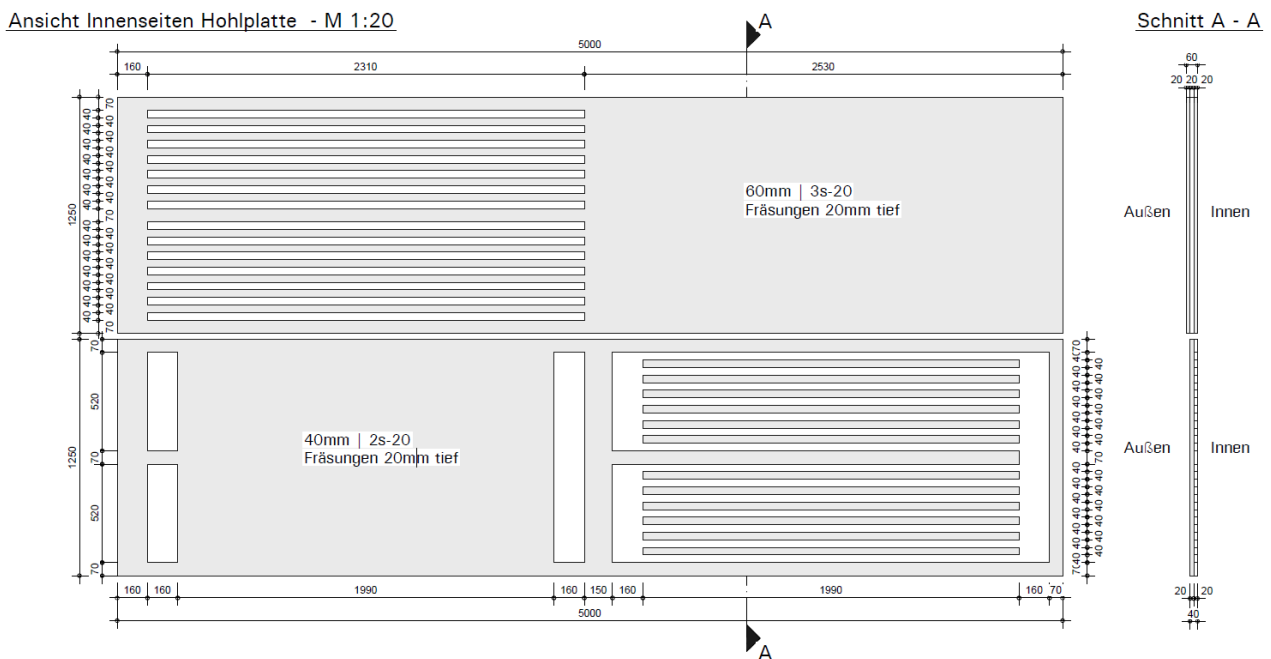


Abbildung 4.2: Abbund-Bemaßung für die Herstellung der prototypischen Probekörper A und B; aus (Binderholz GmbH 2019)

Dem Schnitt auf der rechten Seite der Abbildung kann der Schichtenaufbau der beiden Halbelemente entnommen werden. Oben links, und somit in Schicht drei, sind die Längskanäle des Prototyp A vermaßt. Unten links sind die Erschließungskanäle in Schicht zwei dargestellt. Die Idee hinter dieser Aufteilung ist, dass beim Fräsen der Kanäle in Prototyp A stets parallel zur Faserrichtung des Holzes gearbeitet wird. Die Befürchtung, dass beim Fräsen quer zur Faser Probleme aufgrund der geringen Querkzugfestigkeit des Holzes auftreten, sollte sich, wie später gezeigt, als begründet herausstellen. Auf der rechten unteren Hälfte der Abbildung sind die Kanäle des Prototyp B in Schicht zwei dargestellt. Dabei liegen die 14 Längskanäle quer und die drei Erschließungskanäle längs zur Faserrichtung des Holzes. Um die Stabilität der Lagen gegen Abscherungen, sowie deren Luftdichtheit zu gewährleisten, wurden sämtliche Lagen der Brettsperrholzhalbelemente mit Schmalseitenverklebung der einzelnen Brettlamellen hergestellt.

4.1.3 Produktionsprozess

Einmal digital modelliert und auf dem Werkstücktisch fixiert, übernimmt das Portalbearbeitungszentrum den Abbund der Elemente.



Abbildung 4.3: Vor dem Abbund durch das Portalbearbeitungszentrum wird das Halbelement auf dem Werkstückträger ausgerichtet, fixiert und geometrisch über einen Laser referenziert

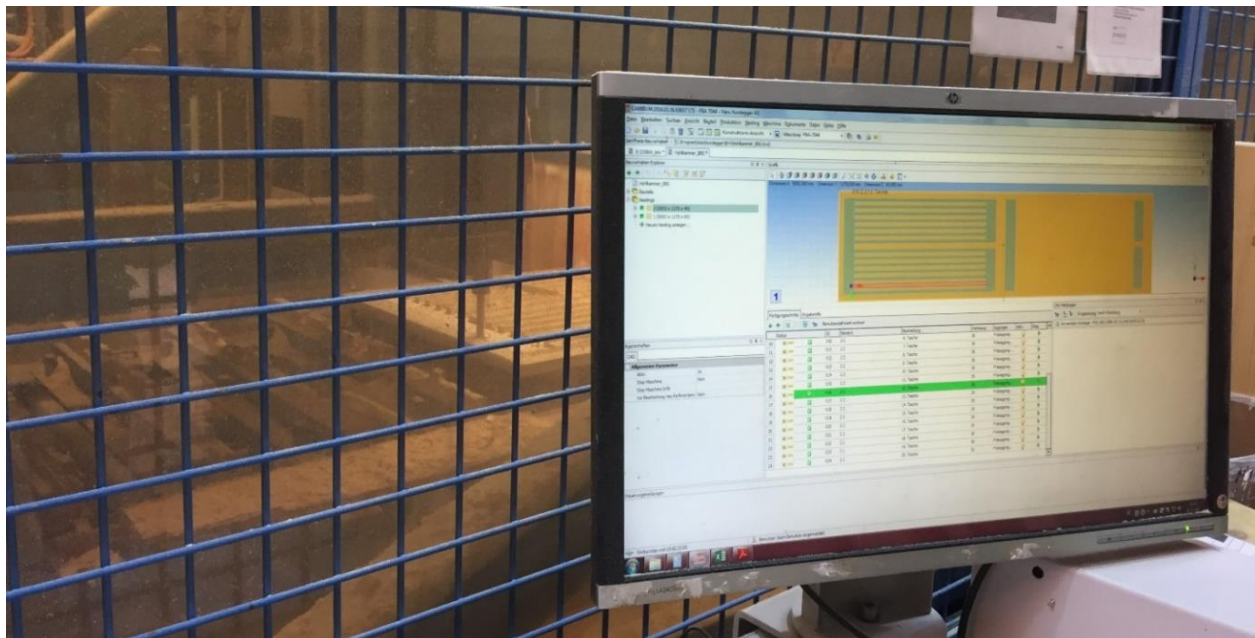


Abbildung 4.4: Das Layout für den Abbund wird mittels Maschinen-Code dreidimensional vorgegeben und automatisch in Bearbeitungsschritte gegliedert



Abbildung 4.5: Der Abbund der Halbelemente erfolgt mit einem 30 mm-Fingernutfräser

Bei quer zur Faserrichtung verlaufenden Fräskanälen ist auf die Schmalseitenverklebung zu achten, um eine Sperrwirkung gegen Abscherungen zu bewirken.



Abbildung 4.6: Das Fräsen der Kanäle in Schicht zwei hat auch quer zur Faserrichtung dort problemlos funktioniert, wo die Lamellen schmalseitenverklebt sind



Abbildung 4.7: Der Auftrag des Klebers erfolgt manuell auf das rückseitige Halbelement

Die benötigte Zeit für das manuelle Auftragen des Klebers betrug nach Arbeitsvorbereitung ca. fünf Minuten. Direkt danach wurde das zweischichtige, vordere Halbelement auf das kleberbenetzte hintere Halbelement gelegt.

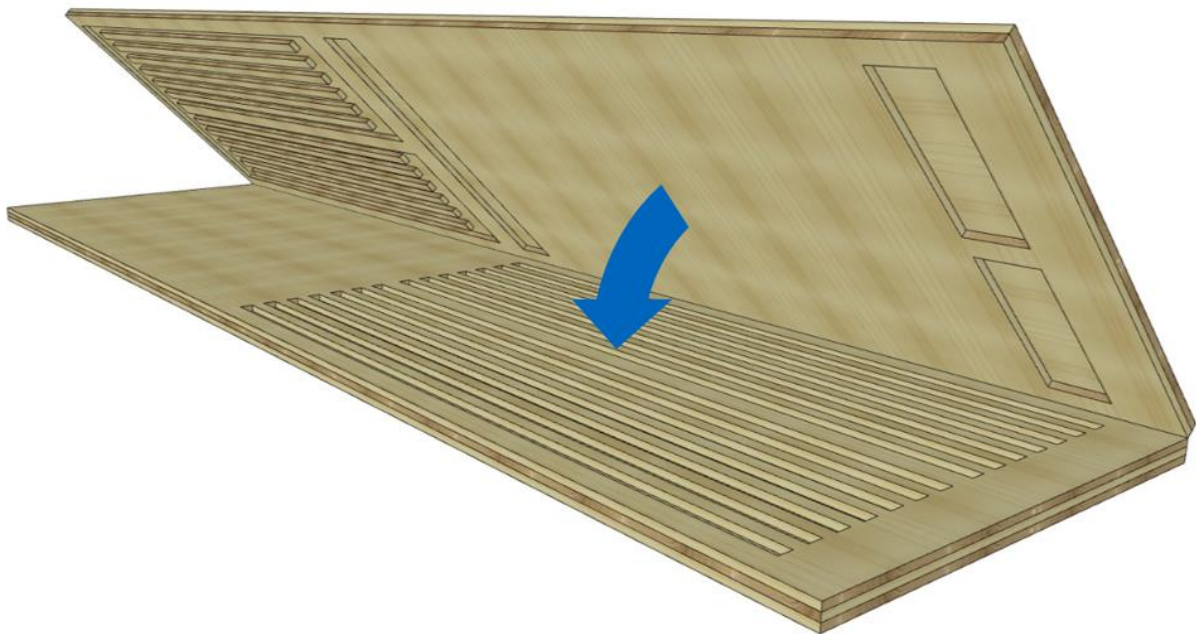


Abbildung 4.8: Produktionsfolge Fräsen der Kanäle, Kleberauftrag, Zusammenklappen, Verpressen und Aushärten (Binderholz GmbH 2019)



Abbildung 4.9: Verpressen und Aushärten der Halbelemente im hydraulischen Pressbett

Schließlich wurde das aus beiden Halbelementen bestehende $L \times B = 5 \text{ m} \times 1,25 \text{ m}$ messende Brettsperrholzelement mit internen Kanälen zum Aushärten für ca. 35 Minuten in die hydraulische Presse gelegt.

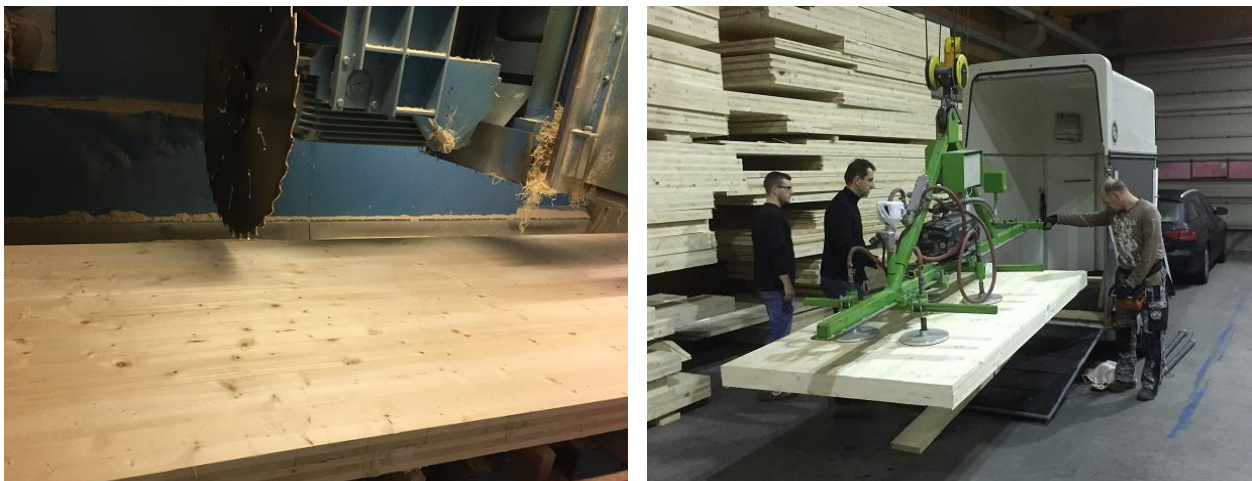


Abbildung 4.10: Zuschnitt des Brettsperrholzelements in die beiden prototypischen Probekörper A und B und Vorbereitung des Abtransports zur Technischen Universität München

Im folgenden Abschnitt soll auf mögliche Optimierungen des Herstellungsprozesses eingegangen werden. Dabei werden Erkenntnisse aus dem Herstellungsprozess selbst sowie später gewonnene Erkenntnisse aus den Untersuchungen im Labor diskutiert.

4.1.4 Ex post Bewertung des Herstellungsprozesses

Nach der Herstellung der ersten beiden Prototypen luftführender, thermisch aktivierter Massivholzelemente kann festgestellt werden, dass ein Großteil der notwendigen Produktionsschritte bereits mit den bestehenden Einrichtungen der Brettsperrholzherstellungsanlagen umsetzbar ist. Die Qualität und die Dauer der Ausführung entsprachen der vorangehenden Planung.



Abbildung 4.11: Zur späteren Positionierung der Messsensoren wurden die Stege stirnseitig markiert

Die Ausgangsprodukte, jene im vorherigen Abschnitt beschriebenen Brettsperrholzhalbelemente, sind ab drei Schichten Standardprodukte der Brettsperrholzherstellung. Da der zweischichtige Aufbau des vorderen Halbelements nicht zu den Standardprodukten gehört, ist dieser als leichte Abweichung anzusehen. Die Produktion wurde zu dessen Herstellung um das Bekleben und Auflegen einer weiteren Lage abgekürzt, wobei sich der Prozess selbst nicht änderte.

Die Produktion bekam die Vorgabe, aus Stabilitäts- und Dichtigkeitsgründen sämtliche Lagen mit schmalseitenverklebten Brettlamellen auszuführen. Dabei wurden für die querliegenden Schichten zwei und vier vorgefertigte Massivholzplatten im Format: $L \times B \times H = 1,25 \text{ m} \times 1,25 \text{ m} \times 0,02 \text{ m}$ verwendet. Aus bisher ungeklärten Gründen wurden diese Massivholzplatten mit einer 5 mm messenden 45° Fase an den Stößen der Platten eingebaut. Zudem sind diese Schichten im Abstand von 1,25 m an den Stoßlinien zwischen den Platten nicht schmalseitig verklebt.

Als problematisch haben sich diese nicht verklebten und angefasten Plattenstöße beim Herstellen der Kanäle in Fräs-Fahrtrichtung quer zur Faser erwiesen. In der Abbildung 4.12 ist einer dieser Stöße vor und nach dem Fräsen der Kanäle dargestellt.



Abbildung 4.12: Gefaster und nicht verklebter Plattenstoß zwischen den Massivholzplatten der zweiten Schicht links vor und rechts nach dem Fräsen

Links in Abbildung 4.12 sind die gefasteten Elementstöße und die sich ergebende V-Nut dargestellt. Wie auf der rechten Seite der Abbildung gezeigt, waren die Folge Abscherungen beim Fräsen. Aufgrund der geringen Zugfestigkeit des Holzes, quer zur Faser, wurden im Bereich neben der V-Nut Stücke herausgeschert, da im Gegensatz zur übrigen Fläche die seitliche Stabilisierung fehlte.

Die entstandene Bruchnut musste daraufhin bereinigt werden. Dafür wurden die Bruchkanten auf ein definiertes Maß begradigt und Füllstücke in die Lücken der Stege eingeklebt und versiegelt.



Abbildung 4.13: Bereinigen der Bruchkante und Einsetzen von Füllstücken zur Vermeidung von hydraulischen Kurzschlüssen im System

Nach dem Planschliff der eingesetzten Füllstücke entsprachen die Stege zwischen den Kanälen im Prototyp B der geplanten Qualität.

Auch im Bereich des Prototyp A waren die Massivholzplatten der Schicht zwei auf die gleiche Weise gestoßen. Zur Vermeidung von hydraulischen Kurzschlüssen, also Querströmung der Systemluft zwischen den Kanälen, wurde die V-Nut vor dem Zusammensetzen der Halbelemente mit schnellhärtender Füllmasse versiegelt.



Abbildung 4.14: Versiegelung zur Vermeidung hydraulischer Kurzschlüsse entlang der V-Nut

Die Versiegelung der V-Nut durch die Füllmasse musste aus zeitlichen Gründen in einem Arbeitsgang erfolgen. Das Schwinden der Masse beim Aushärten führte dazu, dass diese nicht an allen Stellen des Stoßes Ebenen-gleich mit der Oberfläche des Holzes abschließt.

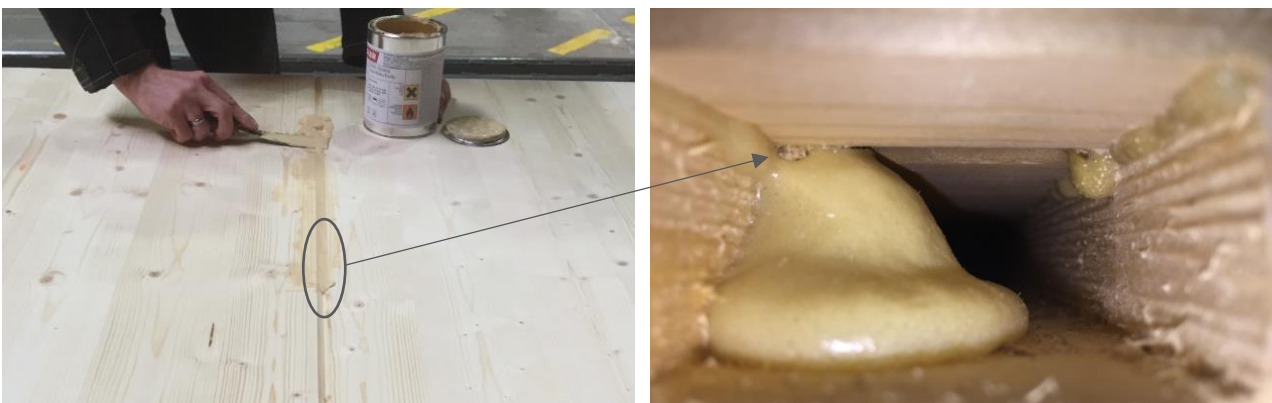
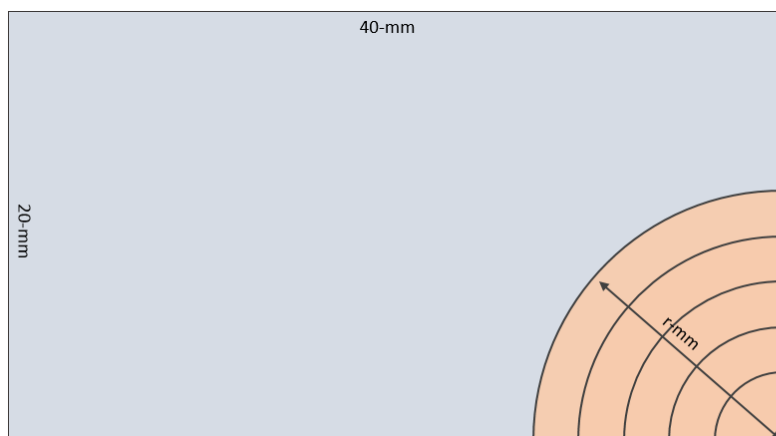
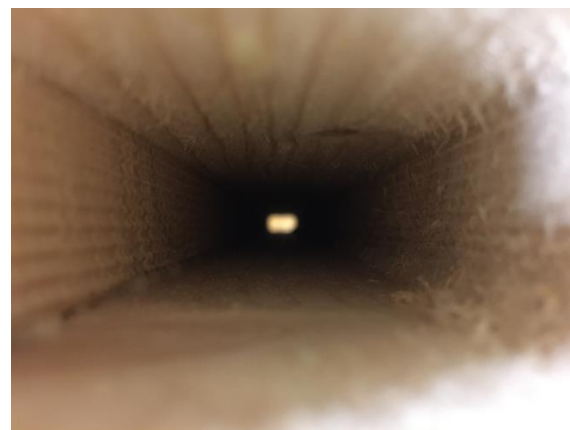


Abbildung 4.15: Eintritt von Kleber in einen Luftkanal

Die Folge davon ist in Abbildung 4.15 rechts gezeigt und konnte erst nach Beendigung der Langzeitlaborversuche durch Zerstören des Probekörpers präziser untersucht werden.

Es wird vermutet, dass beim Kleberauftrag vor dem Zusammensetzen der Halbelemente sich ein Reservoir an Kleber gebildet hat, welches beim Aushärten des PU-Klebers teilweise in einen der Luftkanäle eingetreten ist. Der in einen Längskanal des Prototyp A eingedrungene Kleber schnürte dessen Querschnitt auf ca. die Hälfte ein. Auf Thermographien im Heizbetrieb konnte dieser Kanal anhand der geringeren Leistung und Oberflächentemperatur bereits vor dem Öffnen des Prototyp A eindeutig identifiziert werden. Eine derartige Einschnürung ist bei der Produktion der beiden Prototypen einmal in Kanal 4 des Prototyp A aufgetreten.

Regelmäßiger sind Einschnürungen im Bereich zwischen einem und acht Millimeter aufgetreten. In Abbildung 4.16 sind diese Einschnürungen entlang der manuell beklebten Halbelementgrenze dargestellt. Unten in der Abbildung werden diese je Kanal quantitativ aufgelistet.



Kanal	Einschnür-Radius PU-Schaum [r-mm]	Einschnür-Radius Harzgallen [r-mm]	Querschnitts- verringering	
			[mm ²]	[%]
1	7,5	-	176,7	22,1%
2	5	-	78,5	9,8%
3	7,5	2	176,7	22,1%
4	5	-	78,5	9,8%
5	2	2	12,6	1,6%
6	5	-	78,5	9,8%
7	3,5	-	38,5	4,8%
8	5	-	78,5	9,8%
9	1	2	3,1	0,4%
10	1,5	-	7,1	0,9%
11	1,5	-	7,1	0,9%
12	1,5	-	7,1	0,9%
13	2,5	-	19,6	2,5%
14	7,5	-	176,7	22,1%

Abbildung 4.16: Einschnürung durch PU-Schaum-Kleber und Harzgallen; Auswertung für Prototyp B

Diese in der Abbildung 4.16 dargestellten regelmäßigen Einschnürungen sind die Folge des ungenauen manuellen Kleberauftrags.

Der Tabelle kann entnommen werden, dass die Einschnürungen bis zu 22,1 % des freien Querschnitts verringern und somit erhöhte Druckverluste im Systemluftkreislauf bewirken. Würde anstelle des manuellen Verfahrens ein präziser, maschineller Vorgang den Kleber auf die Elemente bringen, würde dieses Problem stark reduziert werden. Bei dem Bau der prototypischen Probekörper musste der Auftrag des Klebers manuell erfolgen, da die Beklebungseinrichtung der Brettsperrholzherstellungslinie bisher keinen selektiven Auftrag ermöglicht. Dieser ist erforderlich, um lediglich die Stege und nicht den ausgesparten Bereich der Kanäle mit Kleber zu benetzen. Bei der Wahl des Klebers sollte zudem darauf geachtet werden, dass dieser beim Aushärten nicht stark aufschäumt.

Für die weitere Entwicklung des Systems und den Bau weiterer Versuchskörper sollte eine detailliertere Planung des Beklebungsvorgangs sowie eine entsprechende Vorbereitung der Halbelemente vorgesehen werden. Eine deutliche Optimierung des Herstellungsprozesses ist zu erwarten, wenn die Düsenbrücke, durch die der Kleber auf die Flächenelemente aufgetragen wird, eine einzelne oder kleingruppenweise Ansteuerung der Düsen ermöglichen würde. Hierdurch könnte die aufgetragene Klebermenge sehr präzise erfolgen und automatisch überwacht werden. In einem Vorprozess könnte im Rahmen einer Qualitätskontrolle die Oberfläche gescannt und auf Fehlstellen an den Grenzen der Kanäle durch eine leicht reduzierte Klebermenge oder die vorherige Korrektur der Fehlstelle reagiert werden.

Rückblickend kann festgehalten werden, dass der Herstellungsprozess von luftgeführten, thermisch aktivierten Massivholzelementen weitgehend mit verfügbaren, erprobten Produktionsanlagen realisierbar ist. Das Fräsen der Längskanäle könnte durch die Wahl eines Scheibennutfräasers beschleunigt werden. Bei diesem Fräswerkzeug wird zudem durch eine geringere Rauigkeit der Kanaloberflächen eine Reduzierung der Rohrreibungsdruckverluste erwartet. Der einzige irreguläre, rein manuelle Prozess bei der Herstellung der beiden Prototypen war der Auftrag des Klebers und das Bereinigen der V-Nut welche für die hier beschriebene Anwendung wegfallen sollte.

4.2 Versuchskonfiguration

4.2.1 Ziele der Laborversuche und methodisches Vorgehen

In Abbildung 4.17 ist das methodische Vorgehen der experimentellen und theoretischen Untersuchung thermisch aktivierter Massivholzelemente dargestellt.

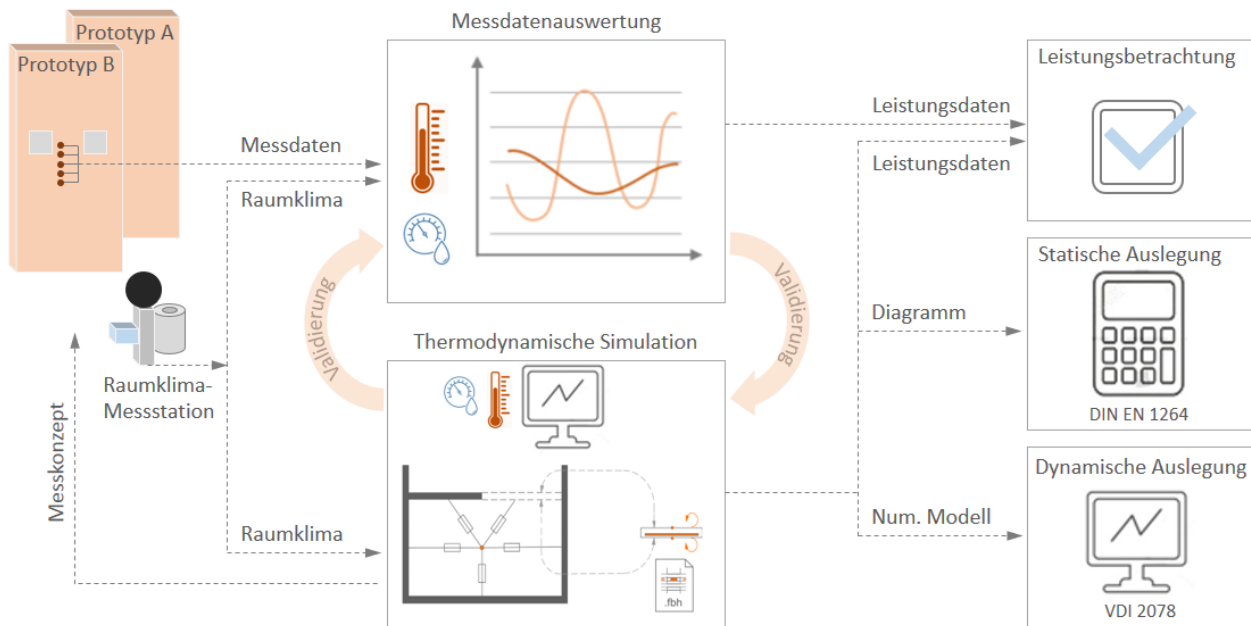


Abbildung 4.17: Methodisches Vorgehen bei der experimentellen und theoretischen Untersuchung

Das Ziel der Untersuchung gliedert sich in drei Bereiche:

- Durchführung von Leistungsbetrachtungen zum Nachweis der Robustheit (insb. gegenüber dem Materialfeuchteverhalten), sowie der Eignung für repräsentative Einsatzszenarien,
- Bereitstellung von Auslegungswerkzeugen zur stationären (statischen) Heizflächenauslegung,
- und Ableitung von numerischen Rechenmodellen zur instationären (dynamischen) Heiz- und Kühlflächenauslegung mittels numerischer Raumklimasimulation.

Diese drei Hauptziele sind in der Abbildung rechts dargestellt. Das Bindeglied zwischen diesen Zielen und dem Ausgangspunkt der Untersuchung sind unterschiedliche numerische Simulationsmodelle zur Beschreibung der thermodynamischen Systemzustände. Die Modelle sind das thermisch dynamische Bauteil- und Raummodell, ein dynamisches hygrisch-thermisches Bauteilmodell sowie ein numerisches Strömungsmodell des Bauteils. Diese drei unterschiedlichen Simulationsmodelle werden anhand der bei den Laborversuchen gewonnenen Messdaten validiert. Das Konzept der Laborversuche leitet sich primär von dem Ziel ab, die Messdaten zur Validierung der Simulationsmodelle zu nutzen.

Danach wurden geeignete Messdatenintervalle, die Art und die Platzierung der Messsensoren zuzüglich einiger weiterer Stützstellen sowie die Sollwertszenarien für die Regelungstechnik der Versuche festgelegt. Darüber hinaus sollen die Messdaten der direkten Leistungsbetrachtung dienen. Mit einer Raumklimamessstation wurden die aktuellen Raumklimabedingungen während der Versuche im Laborraum gemessen, um diese als Randbedingungen für die Bauteilsimulationen im Rahmen der Validierung zu verwenden. Eine vollständige Datenpunktliste mit den Positionen und Spezifikationen der Messsensoren kann Anhang B entnommen werden.

Die Versuche gliedern sich in Kurzzeitversuche, in denen die thermischen Eigenschaften der Probekörper bestimmt werden, und Langzeitversuche zur Untersuchung des hygrischen Verhaltens. Zum Ende hin und im Nachgang der Versuche werden einige zerstörende Untersuchungen der Probekörper durchgeführt.

Zu den thermischen Eigenschaften zählen die Oberflächentemperatur sowie die Heiz- und Kühlleistung in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Vorlauftemperatur. Für die Bestimmung der Regelungsparameter des Systems werden sogenannte Sprungfunktionen des Betriebszustandes gefahren, um aus den resultierenden Sprungantworten die Einschaltverzögerung und die Nachlaufzeit des Systems zu bestimmen. Hierfür wurden je Versuch ca. drei Wochen eingeplant.

Das hygrische Verhalten betrifft das Auffeuchten und Abtrocknen der Elemente in Abhängigkeit der betriebenen Heiz- und Kühlleistung und des umgebenden Raumklimas. Die Feuchteänderung im Holz ist ein verhältnismäßig langsamer Prozess. Hierfür wurden vier Monate je Prototyp eingeplant.

4.2.2 Versuchskonfiguration

Der Umfang der Messtechnik und die Positionierung der Datenpunkte orientieren sich an der Vergleichbarkeit zwischen simulierten und gemessenen Größen. Darüber hinaus werden einige Sensoren als Stützstellen für die Beschreibung räumlich nichtlinearer Zustandsverläufe sowie zur Überprüfung der Regelungstechnik außerhalb des Probekörpers benötigt. Aus organisatorischen Gründen wurden die Lufttemperatur-, Materialtemperatur-, Luftfeuchte-, Materialfeuchte, und Wärmeflussensoren in und an den Probekörpern nach der Produktion eingebaut. Die Versuche wurden in einem temperatur- und luftfeuchtegeregeltem Bereich des Laboratoriums der Materialprüfanstalt Bau-Prüfstelle Holzbau durchgeführt. Sämtliche Raumklimaparameter, welche auf das hygrothermische Verhalten des Probekörpers einwirken, wurden aufgezeichnet. Aus Platzgründen ist der Versuchsstand beweglich gelagert. Ziele des ersten Laborversuchs sind die Feststellung der maximalen Systemleistung im Heizbetrieb und im Kühlbetrieb in Watt je Quadratmeter Systemfläche sowie die Dokumentation auftretender Materialbeeinträchtigungen. Die Erschließung des Wandelements erfolgt in der Ebene des Fußbodenaufbaus. Hierzu wurde eine Luftkonditionierungseinheit mit Heiz- und Kühlregister sowie ein Ventilator im Sockelbereich vor dem Wandelement konstruiert und an das Element angeschlossen. Abbildung 4.18 illustriert die mobile Versuchskonfiguration mit Prototyp B.



Abbildung 4.18: Visualisierung der Versuchskonfiguration – Links: Vorderansicht, Mitte: Vorderansicht mit ausgeblendeter erster Schicht, Rechts: Rückansicht des Prototyp B

Der gebaute Zustand des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 4.19 dargestellt.



Abbildung 4.19: Mobile Versuchskonfiguration Prototyp A; links: Vorderansicht, rechts: Rückansicht

Auf der Vorderseite des Aufbaus ist der Systemluftkreislauf durch die Ein- und Ausströmöffnung nach außen geführt. Die Systemluft wird zuerst durch den Wasser-Luft-Wärmetauscher sowie das elektrische Nachheizregister und dann durch den Ventilator geführt, bevor sie durch die Einströmöffnung unten links wieder in das Element zurückströmt.

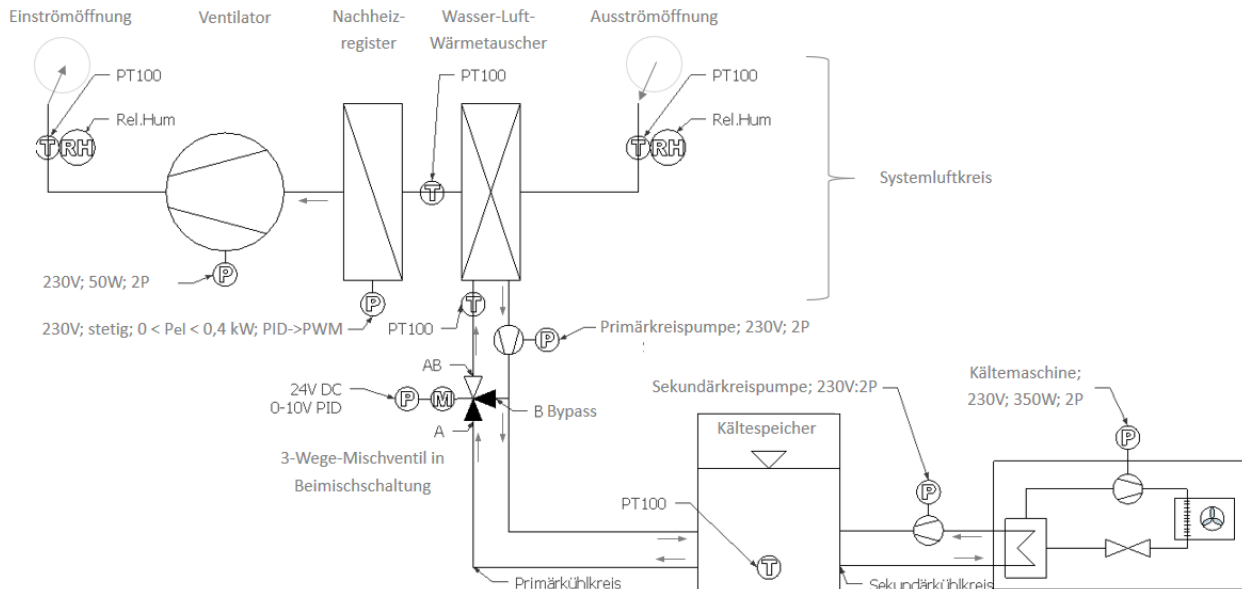


Abbildung 4.20: Hydraulik- und Regelungsschema der Systemluftkonditionierung

Die Temperierung der Systemluft erfolgt im Kühlbetrieb durch den Wasser-Luft-Wärmetauscher in Kombination mit einem elektrischen Nachheizregister. Die Bereitstellung der Kälteleistung erfolgt über eine mobile Kältemaschine. Die Kühlleistung wird bei konstantem Massenstrom durch den Wärmetauscher über eine temperaturgeführte Beimischschaltung im Primärkreis geregelt. Die Führungsgröße ist die Systemlufttemperatur an der Einströmöffnung. Da die Regelung durch das elektrische Heizregister mittels Pulsweitenmodulation¹² weitaus präziser möglich ist als über die hydraulische Regelung, wird die Systemluft zuerst hydraulisch auf eine Temperatur unterhalb der Solltemperatur gebracht, um dann mit dem elektrischen Heizregister präzise auf die eingestellte Solltemperatur erwärmt zu werden. Im Heizbetrieb wird der Versuch rein elektrisch geheizt. In Abbildung 4.21 ist das Versuchsssetup mit Prototyp B und der Raumklimamessstation im Vordergrund dargestellt.

¹² Die Pulsweitenmodulation (PWM) ist ein Verfahren aus dem Fachbereich der Regelungstechnik mit dem Ziel, eine elektrische Leistung variabel zu stellen. Dafür wird der stetige Verlauf einer elektrischen Spannung in Module unterschiedlicher Länge und konstanter Frequenz zerteilt. Durch die Variation der Modullänge kann die elektrische Leistung variiert werden. Bei der Anwendung des elektrischen 230 V-Heizregisters wird die 230 V Wechselspannung im 100 Millisekunden-Takt moduliert. Durch die thermische Trägheit der rein Ohm'schen Last wird die Pulsung der Wärmeabgabe hinreichend geglättet.

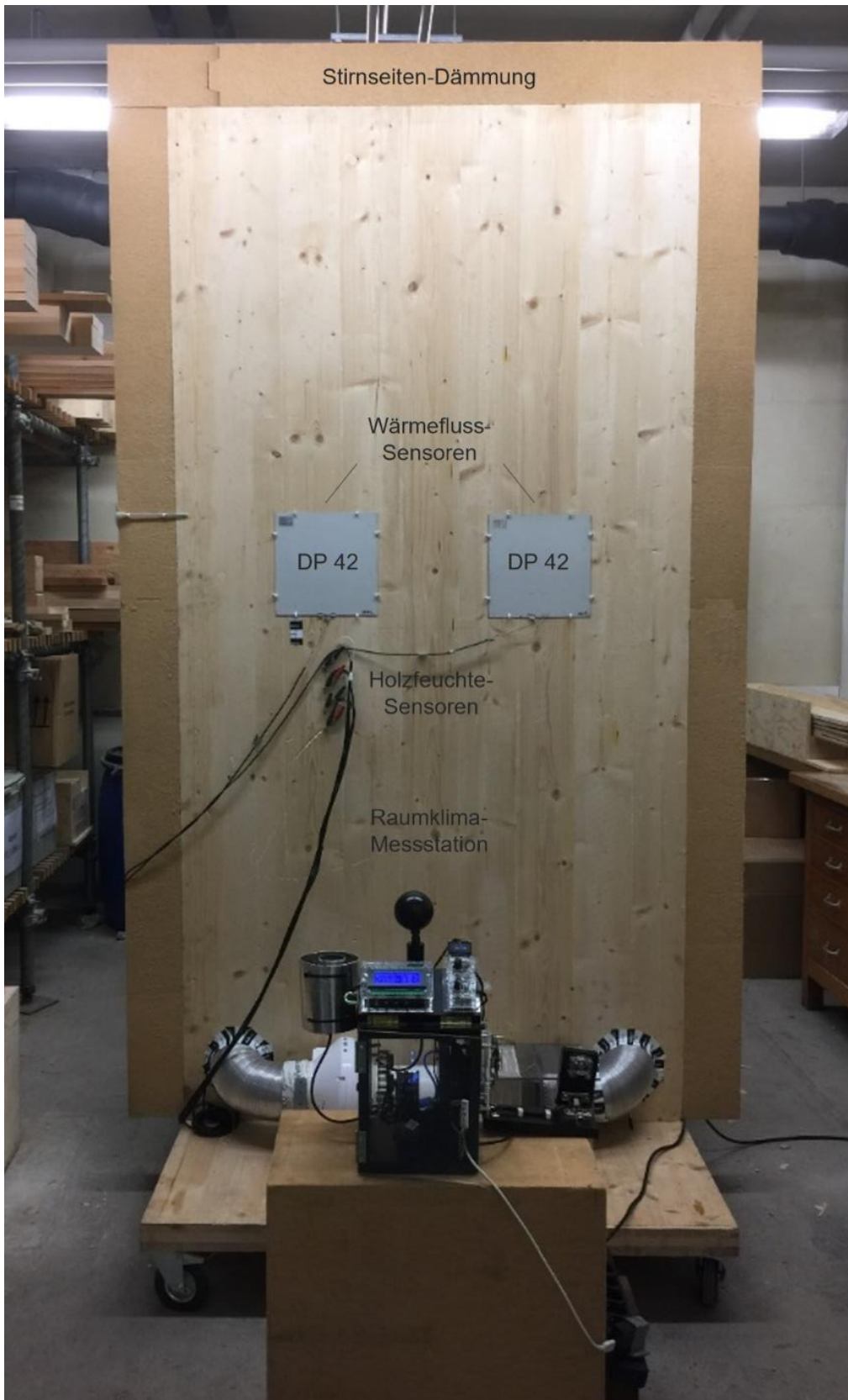


Abbildung 4.21: Versuchskonfiguration mit Prototyp B und Klimamessstation

Im folgenden Abschnitt soll detailliert auf die einzelnen Datenpunkte eingegangen werden.

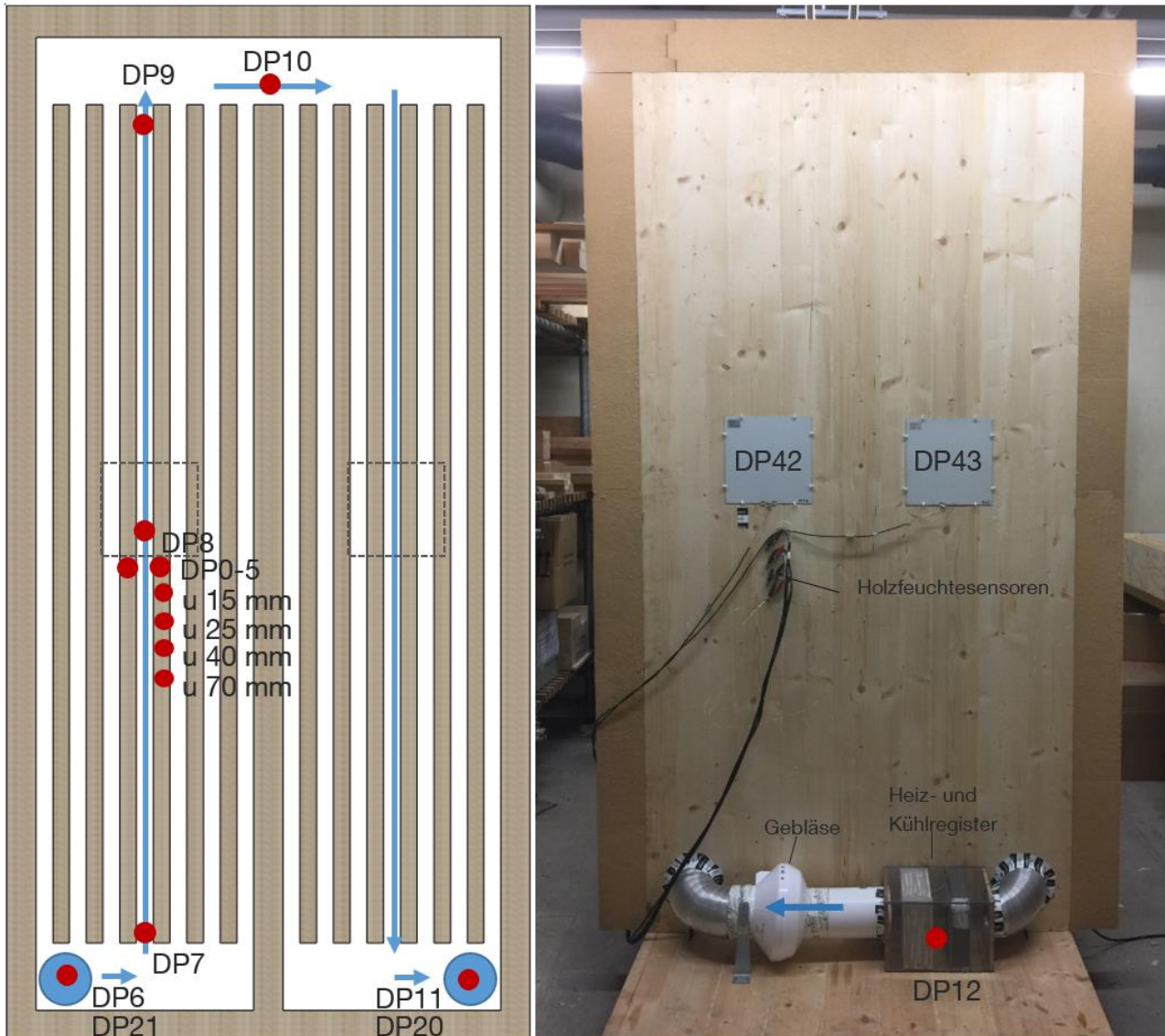


Abbildung 4.22: Datenpunkte im Systemluftkreislauf und an der Elementoberfläche

Die Abbildung 4.22 zeigt sämtliche am und im Massivholzelement positionierten Datenpunkte:

- Messung der Lufttemperatur: DP 6 – DP 12,
- Messung der relativen Luftfeuchte: DP 20, DP 21,
- Messung der Wärmeflussdichte: DP 42, DP 43,
- Messung der Holztemperatur: DP 0 – DP 5,
- Messung der Holzfeuchte u (15, 25, 40, 70) mm

Der sensible Energiegehalt der Systemluft kann über die insgesamt sieben Lufttemperatursensoren im Systemluftkreislauf (DP6 – DP12) gemessen werden. Zur Bestimmung der relativen Luftfeuchte befinden sich Hygrometer an der Ein- und an der Ausströmöffnung. (DP20, DP21).

Mit dem Heiz- und Kühlregister kann die Lufttemperatur in der Einströmöffnung an DP6 geregelt werden. Sämtliche Regelungsaufgaben sowie ein Großteil der Messaufgaben wurden auf der Grundlage des Open Source Baukastensystems der Firma Tinkerforge umgesetzt (Tinkerforge GmbH). Durch eine PID-Regelung können Regelschwankungen der Temperatur auf ein Minimum reduziert werden. Die PID-Parameter sind mit Hilfe des heuristischen Verfahrens nach Chien, Hrones und Reswick bestimmt und während einer zweiwöchigen Lernphase weiter optimiert worden (Schulz 1995).

Die thermische Aktivierung führt zu einer Erwärmung bzw. einer Abkühlung des Massivholzelements. Abhängig von der Temperatur der Bauteiloberfläche gegenüber der Raumlufttemperatur sowie deren relativen Feuchte nimmt die Holzoberfläche Wassermoleküle aus der Raumluft auf oder gibt diese ab. Zur Bestimmung der hygrothermischen Zustände im Material befinden sich im Querschnitt des Brettsperrholzelements sechs Thermosensoren (Tinkerforge GmbH) sowie vier Elektrodenpaare für die Holzfeuchtemessung (Mugrauer).

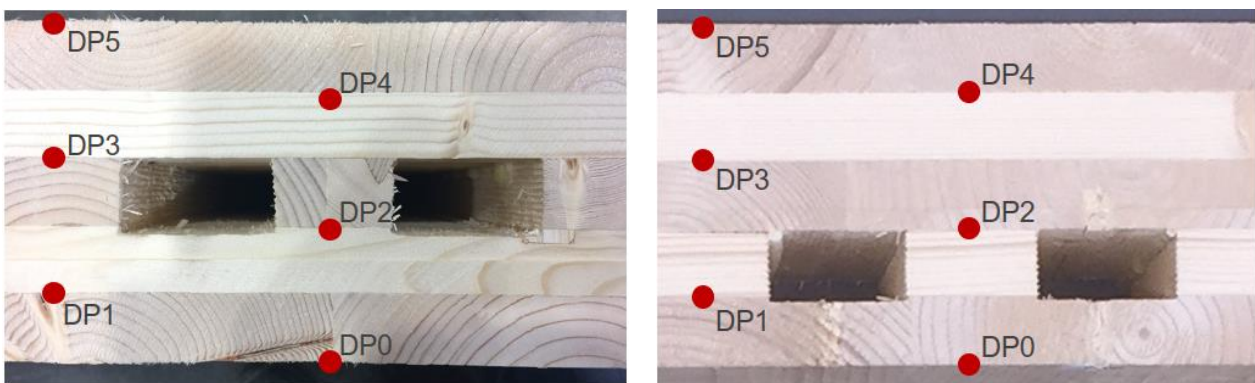


Abbildung 4.23: Holztemperatursensoren: links - Prototyp A; rechts - Prototyp B

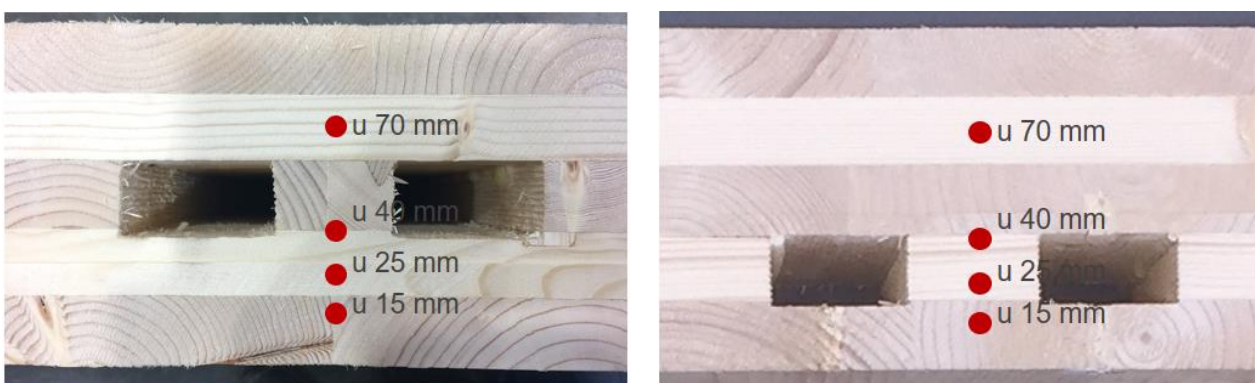


Abbildung 4.24: Holzfeuchtesensoren: links - Prototyp A; rechts - Prototyp B

- Messung der Materialtemperatur: DP 0 – DP 5 (0, 20, 40, 60, 80, 100) mm
- Messung der Holzfeuchte u in: (15, 25, 40, 70) mm

Beginnend mit dem raumseitigen Temperatursensor DP0 bis zum rückseitigen Temperatursensor DP5 kann der Temperaturverlauf an jeder Schichtgrenze der fünf Lagen des Brettsperrholzelements bestimmt werden. Die Holzfeuchte wird in vier Tiefen durch elektrische Widerstandsmessung bestimmt. Bei der Verlegung der Sensoranschlusskabel wurde auf einen spitzen Winkel zwischen dem Kabel und den erwarteten Isothermen im Umfeld der Messung von max. 15 Grad geachtet. So soll der Temperaturmessfehler durch den Wärmenachfluss des Kabels gering gehalten werden. Die Positionen der Materialtemperatursensoren sowie der Materialfeuchtesensoren befinden sich, wie in Abbildung 4.22 ersichtlich, auf der linken Elementseite auf halber Höhe des aufwärts gerichteten Luftstromes. Um die thermischen Eigenschaften des Holzelements durch den Einbau der Sensoren weniger stark zu verfälschen, wurden die Sensoren DP0-DP5 auf zwei benachbarte Stege aufgeteilt. In beiden Prototypen sind, wie in Abbildung 4.23 und Abbildung 4.24 gezeigt, die in das Holz eingebauten Sensoren identisch platziert. Die Lufttemperatursensoren befinden sich ebenfalls in gleicher Position, jedoch durch die Lage der Kanäle in Prototyp B um eine Schicht nach vorne versetzt.

4.2.3 Laborumgebung

Die Versuche fanden in den klimatisierten Laboratorien der Materialprüfanstalt Bau, Prüfstelle Holzbau statt. Die Versuche an Prototyp A wurden in der großen Versuchshalle (Meier-Jens-Halle) durchgeführt. Da sich die Raumklimakonditionen aufgrund des Verglasungsanteils der Hallenfassade und des unregelmäßig geöffneten Hallentors als nicht ausreichend konstant erwiesen, wurden die Versuche an Prototyp B in ein unterirdisches Labor mit effektiverer Raumklimaregelung verlegt. Den direkten Leistungsvergleich zwischen den beiden Prototypen sollten die geänderten Raumklimarandbedingungen nicht beeinträchtigen, da dieser auf der Grundlage der thermodynamischen Simulationsmodelle stattfand, die jeweils mit den Versuchsdaten und den zugehörigen gemessenen Raumklimadaten validiert wurden.

Um die Raumklimakonditionen möglichst detailliert in der Messdatenauswertung und in der Simulation als Randbedingungen für den Versuch bestimmen und beschreiben zu können, wurden folgende Parameter des Raumklimas parallel zu den Versuchen gemessen:

- Lufttemperatur in 0,1 m Höhe
- Lufttemperatur in 1,1 m Höhe
- Schwarzkugeltemperatur in 1,1 m Höhe
- Relative Luftfeuchte in 1,1 m Höhe
- Mittlere Infrarottemperatur des thermisch aktivierten Elements (90°- Strahlungshalbraum)
- Mittlere Infrarottemperatur der rückseitigen Strahlungshalbraum (90°-rotations-symmetrisch um die Flächennormale des thermisch aktivierten Elements)
- Weitere: Stoffmengenkonzentration an CO₂, Beleuchtungsstärke

Aus den direkt gemessenen Größen Lufttemperatur in 1,1 m Höhe und Schwarzkugeltemperatur in 1,1 m Höhe wurde mit Gleichung (4-1), gem. DIN EN ISO 7726, die mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung \bar{t}_r bestimmt. Dafür wurde unter der Annahme einer natürlichen Konvektion an der Schwarzkugel, deren konvektiver Anteil des Wärmeaustauschs mit der Umgebung bereinigt. Durch stichprobenartige Luftgeschwindigkeitsmessungen konnte diese Annahme bestätigt werden.

Der Durchmesser der Schwarzkugel misst $D = 0,07 \text{ m}$ und der Emissionsgrad der Schwarzkugelbeschichtung beträgt $\varepsilon_g = 0,95$ (Tinkerforge GmbH).

$$\bar{T}_r = \left[(T_g + 273)^4 + \frac{0,25 \cdot 10^8}{\varepsilon_g} \cdot \left(\frac{|T_g - T_a|}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot (T_g - T_a) \right]^{\frac{1}{4}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (4-1)$$

\bar{T}_r	[$^\circ\text{C}$]	Mittlere Strahlungstemperatur
T_g	[$^\circ\text{C}$]	Schwarzkugeltemperatur
ε_g	[-]	Emissionsgrad der Schwarzkugelbeschichtung
T_a	[$^\circ\text{C}$]	Temperatur der Umgebungsluft
D	[m]	Außendurchmesser der Schwarzkugel

Aus der so errechneten mittleren Strahlungstemperatur der Umgebung und der Lufttemperatur kann durch Anwendung der Gleichung (2-49) die Operative Raumtemperatur T_{op} bestimmt werden.

Eine detaillierte Beschreibung des Raumklimamessstands kann der Master’s Thesis (Duncker 2017) entnommen werden.

4.3 Versuchsergebnisse

4.3.1 Hinweise zur Darstellung der Messdaten

Korrekturfaktor zur Angabe der effektiven Oberflächentemperatur

Der Temperaturverlauf der Systemluft im thermisch aktivierten Element verhält sich nicht linear, sondern ähnlich der qualitativ angedeuteten Temperaturkurve in Abbildung 4.25.

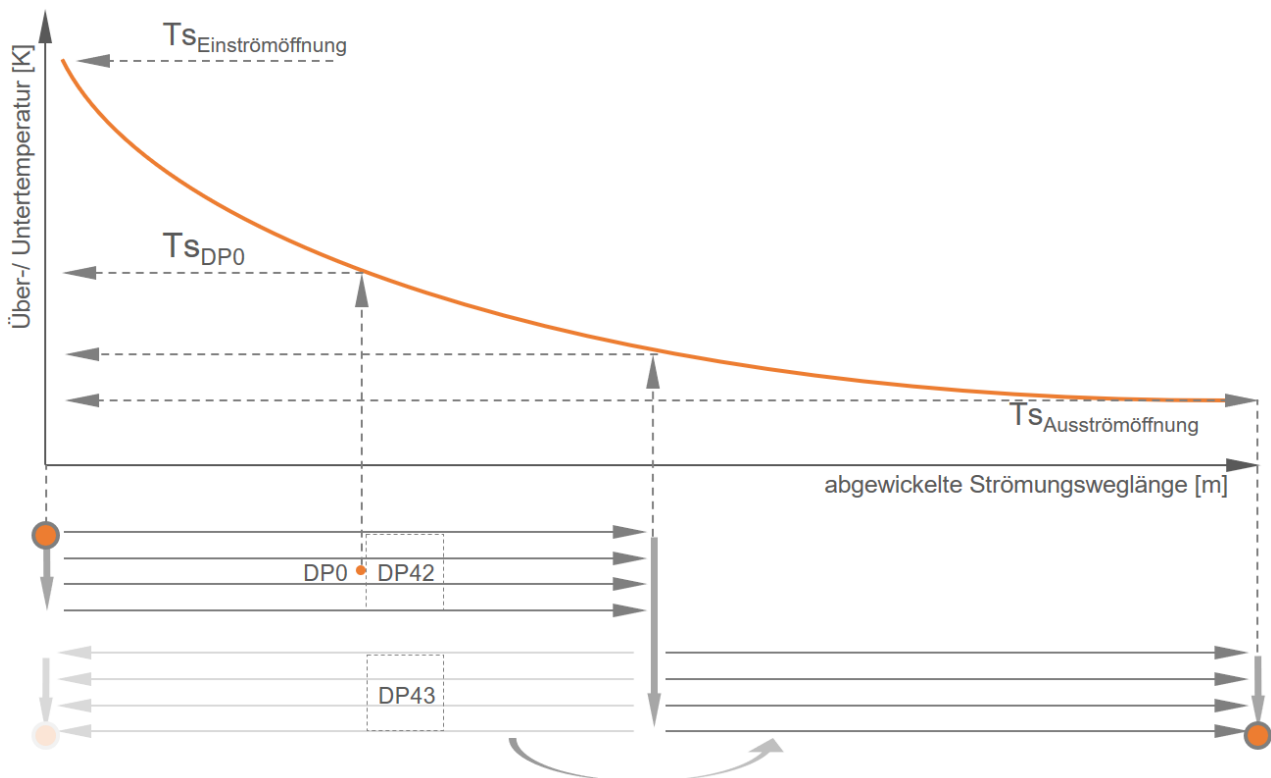


Abbildung 4.25: Verlauf der Oberflächentemperatur im Heizbetrieb (qualitativ überzeichnet) über der abgewickelten Strömungsweglänge des thermisch aktivierten Massivholzelements

Dieser Temperaturverlauf entspricht dem natürlichen Verlauf der Temperatur eines Wärmeüberträgermediums in einem Wärmetauscher. Zu Beginn der Strömungsstrecke ist die Temperaturdifferenz zwischen Medium und dem Element maximal. Hier wird die größte Leistung freigesetzt. Mit der abgegebenen bzw. aufgenommenen Energiemenge gleicht sich die Temperatur des Mediums asymptotisch der Temperatur des wärmetauschenden Elements an.

Betrachtet man die Oberfläche des thermisch aktivierten Massivholzelements durch eine Wärmebildkamera, fällt bestätigend auf, dass die Temperaturdifferenz über der Oberfläche nicht gleichmäßig fallend ist, sondern entlang des Strömungsweges der Systemluft im Inneren regressiv abfällt. In Abbildung 4.26 ist eine Thermographie neben dem Realbild von Prototyp B im Kühlbetrieb bei 16 °C Vorlauftemperatur und 21,1 °C operativer Raumtemperatur dargestellt.

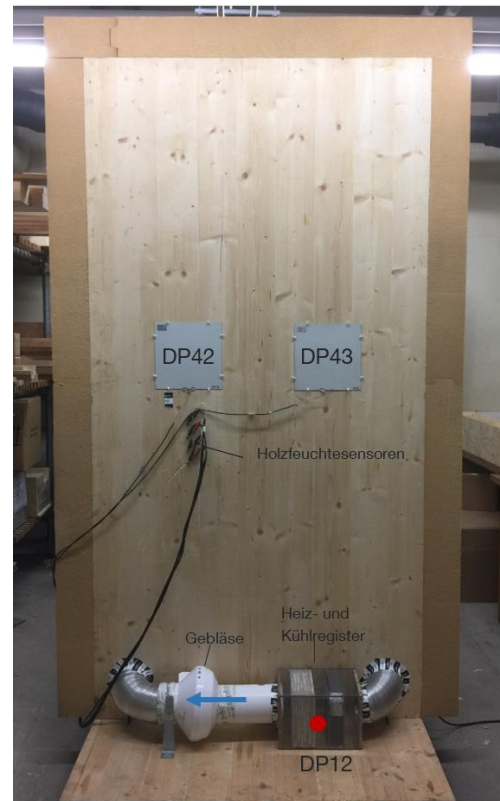
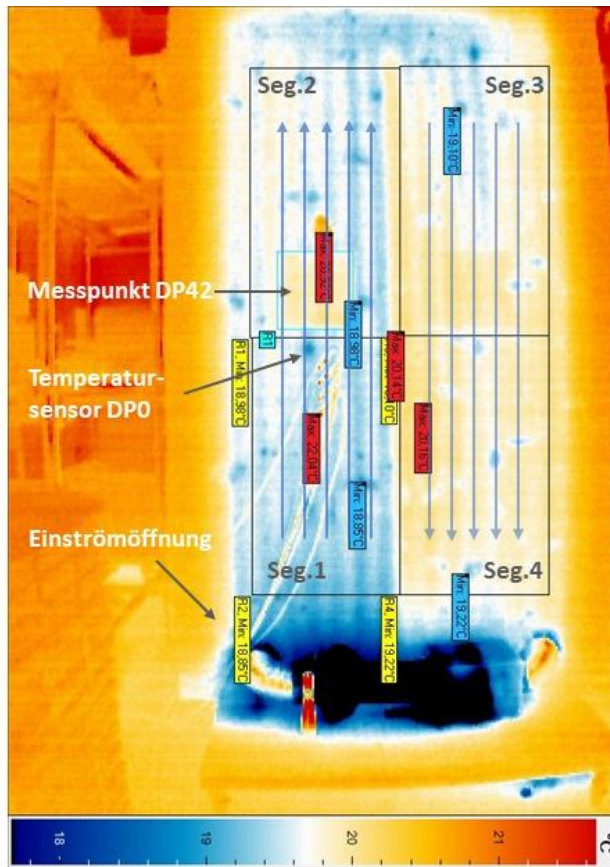


Abbildung 4.26: Verlauf der Oberflächentemperatur im Kühlbetrieb ($T_{VL} = 15,8 \text{ °C}$) an Prototyp B

Die Thermographie zeigt deutlich, wie der Temperaturverlauf von der Einströmöffnung unten links entlang des Strömungsweges durch das Element bis zur Ausströmöffnung unten rechts abnimmt. Die Progression der Abnahme soll mit der Segmentierung des Elements in der folgenden Tabelle quantifiziert werden.

Tabelle 4-1: Bestimmung der relativen Temperaturabweichung zwischen dem Oberflächentempersensor DP0 und der mittleren Oberflächentemperatur im Kühlbetrieb

Datum:	31.05.2018		Modus	Kühlbetrieb, stationär
Zeit	16:16:52		Emission	0,95
Einströmöffnung DP6	15,8 °C		Sensorwert DP0	19,87 °C
Segment 1	19,5 °C		Mittelwert der Segmente 1-4 T_m	19,71 °C
Segment 2	19,67 °C	-0,87%		
Segment 3	19,79 °C	-0,61%		
Segment 4	19,87°C	-0,40%		
Ausströmöffnung DP11	17,7 °C		Abweichung T_{DP0} zu T_m	+ 0,81 %

In der Tabelle 4-1 sind die gemittelten Oberflächentemperaturen in den Segmenten 1-4 aufgetragen. Zunächst fällt auf, dass die Änderung der Temperatur nicht linear, sondern wie oben postuliert regressiv verläuft. Während zwischen den Segmenten 1 und 2 die Temperatur um 0,87 % abnimmt, verändert sie sich zwischen den letzten beiden Segmenten um nur noch 0,40 %. Darüber hinaus zeigt die Tabelle, dass der Oberflächentempersensor DP0 aufgrund der Position nicht den Mittelwert der Oberflächentemperatur anzeigt, sondern im vorliegenden Szenario um + 0,81 % davon abweicht. Für die Auswertung der Messdaten sollte der Sensorwert bei gleichen thermischen Randbedingungen um diesen Wert korrigiert werden. Es wird vermutet, dass die Abweichung T_{DP0} zu t_m wiederum abhängig ist von der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Oberflächentemperatur und der operativen Raumtemperatur T_{op} . Einen Beweis hierfür liefert die Extremwertbetrachtung für den Fall: $T_m = T_{op}$. In diesem Fall muss auch $T_{DP0} = T_m = T_{op}$ entsprechen, da sich alle Temperaturen der operativen Raumtemperatur angeglichen haben.

Einführung des Temperaturkorrekturfaktors f_K für den Kühlbetrieb.

$$f_K = 1 + \frac{|T_{DP0} - T_{op}|}{\Delta T_{K \max}} \cdot 0,0081 \quad [-] \quad (4-2)$$

f_K	[°C]	Temperaturkorrekturfaktor für die Bestimmung der mittleren Oberflächentemperatur
T_{DP0}	[°C]	Temperatur des Oberflächentempersensors DP0
T_{op}	[-]	Operative Raumtemperatur
$\Delta T_{K \max}$	[°C]	Maximale Temperaturdifferenz der Oberflächen im Kühlbetrieb (1,4 K ¹³)

Der Temperaturkorrekturfaktor nach Formel (4-2) berücksichtigt die Abweichung zwischen der tatsächlichen mittleren Oberflächentemperatur und dem Messwert des Oberflächentempersensors DP0. Dieser kann Werte im Bereich $f_K > 1$ annehmen. Der Faktor ist so formuliert, dass die Korrektur linear von der Temperaturdifferenz zwischen dem Messwert des Sensors und der operativen Raumtemperatur abhängt und bei Temperaturgleichheit im ausgeschalteten Zustand zu 1 wird. Für weitere Versuche wird empfohlen, sechs Oberflächentempersensoren entlang des Strömungsweges einzubauen.

¹³ Aus Messdatentabelle zum Zeitpunkt der Thermographie ermittelt

Einführung des Temperaturkorrekturfaktors f_H für den Heizbetrieb.

Analog muss auch für den Heizbetrieb eine Temperaturkorrektur vorgenommen werden. Wie im Kühlbetrieb ist auch im Heizbetrieb die Temperaturdifferenz zwischen dem Sensorwert an DP0 und der operativen Raumtemperatur zu berücksichtigen. Somit muss der Temperaturkorrekturfaktor f_K stets positiv und kleiner als eins sein. ($0 < f_H < 1$) Zur Ermittlung des Faktors für den Heizbetrieb konnten keine plausiblen Werte mittels Thermographie gewonnen werden. Der Temperaturkorrekturfaktor für den Heizbetrieb wird in Anlehnung an die Proportionen der Messwerte der Wärmeflussmessplatten DP42 und DP43 formuliert. Der Korrektur liegt die Annahme zugrunde, dass der Verlauf der stationären Wärmestromdichte eine ähnliche mathematische Charakteristik aufweist wie der in Abbildung 4.25 gezeigte Temperaturverlauf.

$$f_H = 1 - \frac{|T_{DP0} - T_{op}|}{\Delta T_{H\ max}} \cdot 0,09 \quad [-] \quad (4-3)$$

f_H	[°C]	Temperaturkorrekturfaktor für die Bestimmung der mittleren Oberflächentemperatur
T_{DP0}	[°C]	Temperatur des Oberflächentempersensors DP0
T_{op}	[-]	Operative Raumtemperatur
$\Delta T_{H\ max}$	[°C]	Maximale Temperaturdifferenz der Oberflächen im Heizbetrieb (7,93 K)

Bei der folgenden Darstellung der Messdaten wird die Angabe der mittleren Oberflächentemperatur des thermisch aktivierten Elements mit den in den Gleichungen (4-2) und (4-3) beschriebenen Korrekturfaktoren berechnet. Die Messungenauigkeit aller Thermosensoren beträgt $0,3\ K + 0,005 \cdot T$ (Tinkerforge GmbH). Diese vom Hersteller angegebene Messungenauigkeit wurde im Rahmen einer Eisbadkalibrierung nach (DEUTSCHER KALIBRIERDIENST DKD 2003) überprüft. Dort zeigten die Sensoren deutlich geringere Abweichungen zueinander und gegenüber einem auf 0,1 K geeichten Sensor. Für die Auswertung der Versuchsergebnisse wird trotz geringerer festgestellter Abweichungen der Herstellerwert angenommen.

Die Angabe der mittleren Wärmestromdichte an der Oberfläche des Elements erfolgt durch arithmetische Mittelung der Datenpunkte PD42 und DP43. Für die Wärmeflussmessplatten der Firma Ahlborn wird die Ungenauigkeit mit 5 % des Messwertes angegeben (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH 2019).

In den folgenden Abbildungen erfolgt die Darstellung der thermischen Leistung der aktivierten Massivholzelemente in Form der mittleren Wärmestromdichte und der mittleren Temperatur an der Elementoberfläche in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur und unter Angabe der operativen Temperatur der Umgebung.

Im Rahmen der detaillierten Verlaufsbeachtung soll auf die Versuchsergebnisse des Prototyp B eingegangen werden.

4.3.2 Thermische Leistung

Im folgenden Diagramm ist das Versuchsszenario ‚Heizen 45 °C – Abschalten‘ an Prototyp B bei einer operativen Raumtemperatur von 21,6 °C dargestellt.

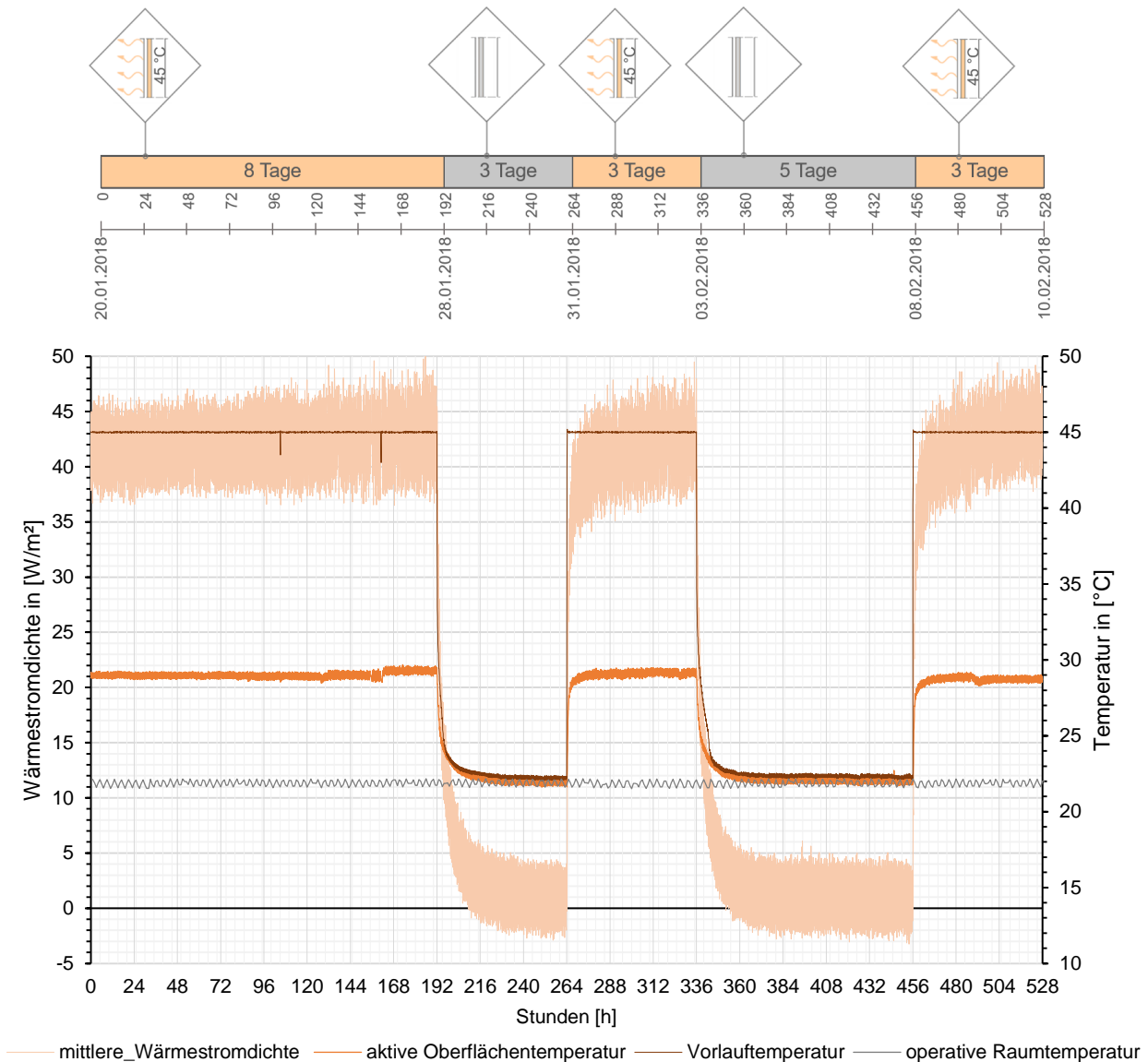


Abbildung 4.27: Thermische Leistungsdaten zum Szenario: Heizen-45 °C-Abschalten an Prototyp B

Abbildung 4.27 zeigt die gemessenen Leistungs- und Temperaturdaten des Prototyp B während eines Heiz- und Abschaltbetriebs über 528 Stunden. Im oberen Teil der Abbildung sind die Betriebszustände über der Zeit und unter Angabe der Vorlauftemperatur (VLT) dargestellt; in Anlehnung an (Vitopoulou 2018) In den Rauten oberhalb sind die Vorlauftemperaturen eingetragen. Dort, wo keine Vorlauftemperatur ausgewiesen ist, befindet sich das System im Abschaltzustand.

Während des Versuchs wurde der Heizbetrieb nach Erreichen des stationären Zustandes zweimal aus- und wieder eingeschaltet, um neben der stationären Leistung auch die instationären Zustände zu bestimmen. Die operative Innenraumtemperatur des Laborraumes ist grau dargestellt und schwankt um einen Mittelwert von 21,83 °C. Die Standardabweichung durch die vom Laborklimagerät aufgeprägten Schwankungen beträgt 0,39 K. Die stationäre Leistung wird beginnend für den gezeigten 192-stündigen Betriebszustand Heizen bei 45 °C Vorlauftemperatur (VLT) als Mittelwert angegeben. Die Vorlauftemperatur konnte in diesem Zeitraum auf 44,99 °C annähernd konstant geregelt werden. Die Standardabweichung der Regelgröße konnte durch eine Lernphase des PID-Regelalgorithmus auf 0,02 K im Heizbetrieb optimiert werden. Die mittlere Temperatur der raumseitigen Oberfläche beträgt nach Erreichen des stationären Zustandes im Heizbetrieb 29,00 °C. Das entspricht einer Erhöhung von 7,17 K gegenüber der operativen Raumtemperatur. Der Mittelwert der mittleren Wärmestromdichte auf der Massivholzoberfläche beträgt in diesem Zeitraum 42,49 W/m² bei einer Standardabweichung von 3,2 K. Die starken Schwankungen der gemessenen Leistung an der Elementoberfläche resultieren aus dem Regelverhalten des Laborklimagerätes und werden von dessen Lufttemperatur- und relativen Luftfeuchteschwankungen von außen auf das Element aufgeprägt.

Die instationäre Erwärmung des Massivholzquerschnitts lässt sich in Abbildung 4.28 nachvollziehen. Der dargestellte achtstündige Ausschnitt entspricht den Stunden 264 - 272 in Abbildung 4.27.

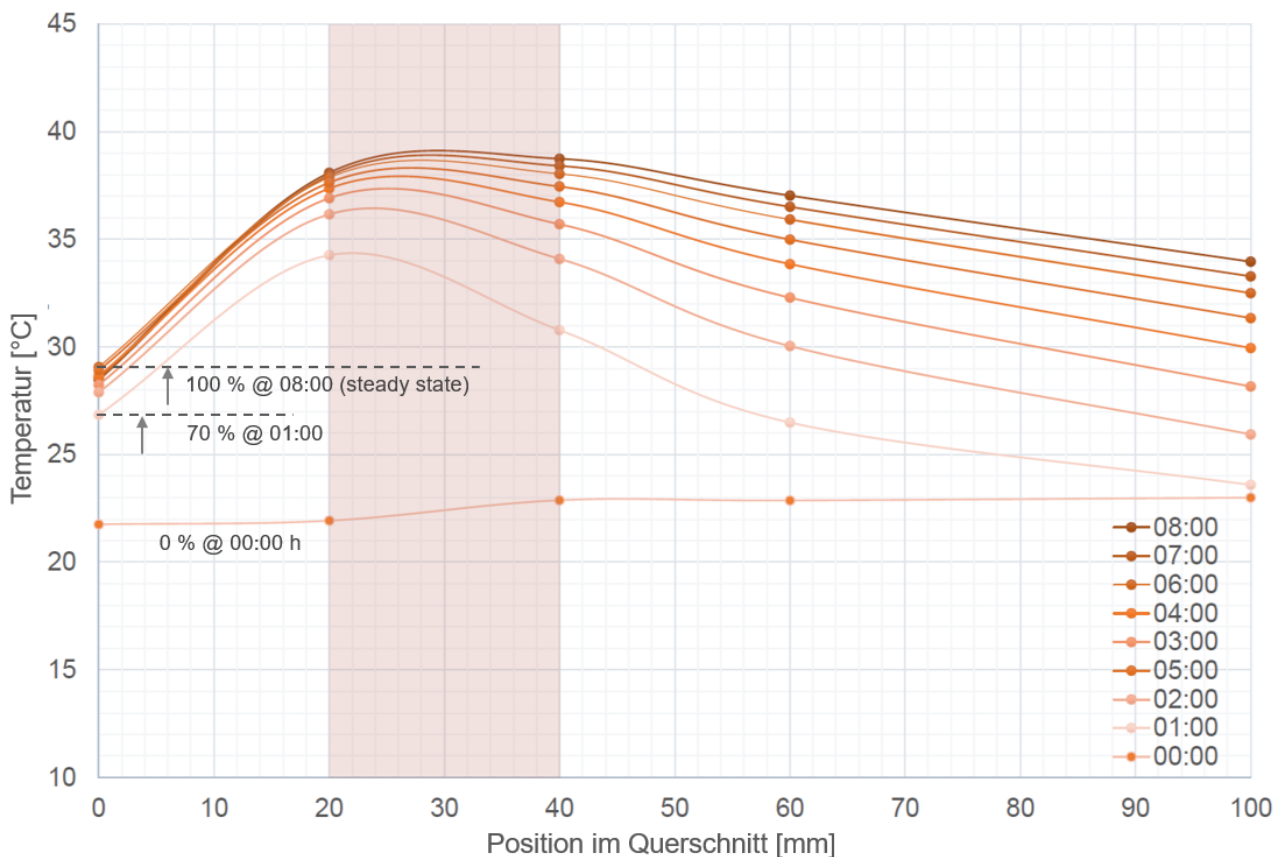


Abbildung 4.28: Zeitliche Änderung der Temperaturverläufe beim Aufheizvorgang im Querschnitt des Massivholzelements, die thermisch aktivierte Schicht ist hellrot markiert

Der hellrot markierte Bereich entspricht der thermisch aktivierten Schicht. Diese liegt bei Prototyp B in der zweiten Brettlage, wird also mit 20 mm Fichtenholz überdeckt. Die zeitliche Änderung der raumseitigen Oberflächentemperatur determiniert die Reaktionsgeschwindigkeit des Systems. Bezogen auf die maximale Temperaturerhöhung im stationären Zustand werden ab dem Einschaltzeitpunkt:

- nach 30 Minuten 39,3 %,
- nach 60 Minuten 70,2 %
- und nach 90 Minuten bereits 81,5 %

der stationären Oberflächentemperaturerhöhung erreicht. Bei Prototyp A beträgt die Dauer bis zum Erreichen einer 70 prozentigen Temperaturerhöhung ca. zwei Stunden.

Als erste Faustformel lässt sich hieraus ableiten, dass bei dem verwendeten Fichtenholz mit ca. einer Stunde Verzögerung je Zentimeter Holzüberdeckung gerechnet werden kann, bis 90 % der maximalen Leistung erreicht werden. Eine präzise Angabe der Oberflächentemperaturen und Wärmestromdichten als Funktionen der Vorlauftemperatur für beide Prototypen kann der Leistungsbetrachtung in Kapitel 6 entnommen werden.

Als nächstes wird auf den Kühlbetrieb eingegangen sowie aktive Betriebswechsel zwischen Heiz- und Kühlbetrieb diskutiert. Dafür wird ein 336-stündiger Ausschnitt mit drei Kühlzyklen, einer Abschaltung, einem Heizbetrieb und vier Betriebswechseln betrachtet. Die Abfolgen und Dauer der Betriebsweisen können dem Zeitstrahl in Abbildung 4.29 entnommen werden. Die operative Raumtemperatur wird vom Betrieb des thermisch aktivierten Massivholzelements leicht beeinflusst. Sie beträgt im Kühlbetrieb 20,88 °C bei einer Standardabweichung von 0,19 K und im Heizbetrieb 21,22 °C bei einer Standardabweichung von 0,21 K. Die Vorlauftemperatur der Systemluft wird im Kühlbetrieb auf 16,01 °C bei einer Standardabweichung von 0,23 K geregelt. Im Heizbetrieb beträgt sie ähnlich dem oben beschriebenen Versuch 45,00 °C bei einer Standardabweichung von 0,02 K.

Rand- und Leistungsdaten können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 4-2: Stationäre Mittelwerte zum Versuchsablauf ,Kühlen -16 °C Heizen -45 °C' an Prototyp B

Szenario	Kühlen 16 °C vom 21.05.-23.05.2018		Heizen 45 °C vom 23.05.-29.05.2018	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
operative Raumtemperatur	20,88 K	0,19 K	21,22 K	0,21 K
Vorlauftemperatur	16,01 K	0,23 K	45,00 K	0,02 K
Oberflächentemperatur	20,04 K	0,12 K	26,13 K	0,22 K
Wärmestromdichte	-9,44 W/m ²	1,80 W/m ²	44,84 W/m ²	3,41 W/m ²

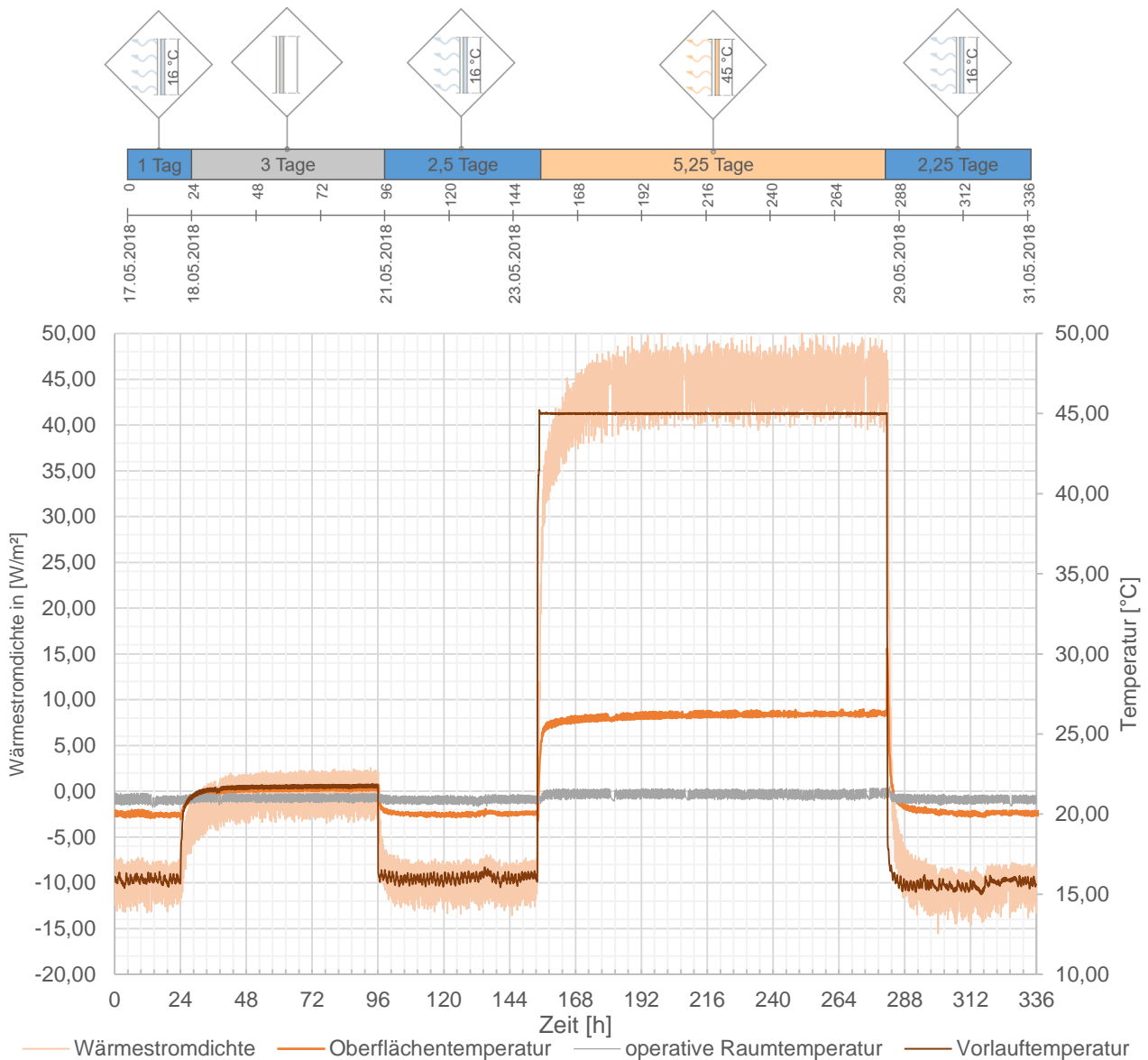


Abbildung 4.29: Thermische Leistungsdaten zum Szenario: Kühlen 16 °C – Heizen 45 °C an Prototyp B

Bei der Auswertung der in Abbildung 4.29 gezeigten Versuchsergebnisse fällt auf, dass die mittlere Wärmestromdichte an der Oberfläche bei gleicher Vorlauftemperatur um 2,4 W/m² höher liegt als bei dem in Abbildung 4.27 beschriebenen Versuch. Diese Abweichung kann mit der im Mittel um 0,6 K geringeren operativen Raumtemperatur begründet werden. Je niedriger die Temperatur der Umgebung, desto mehr Wärme kann von der Oberfläche des Elements abgegeben werden.

In den folgenden zwei Abbildungen soll das instationäre thermische Verhalten des Massivholzquerschnitts illustriert werden.

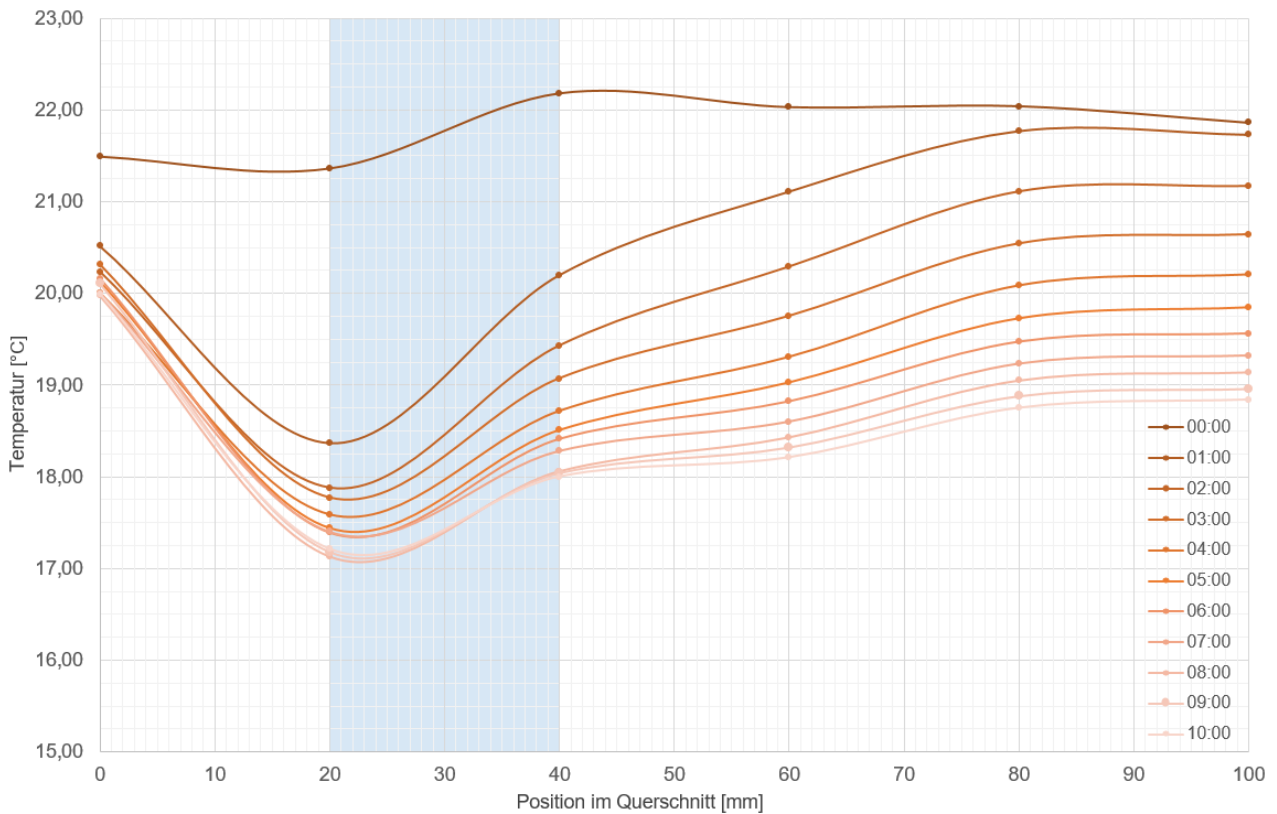


Abbildung 4.30: Zeitliche Änderung der Temperaturverläufe beim Abkühlvorgang im Querschnitt des Massivholzelements, die thermisch aktivierte Schicht ist hellblau markiert

Der in Abbildung 4.30 gezeigte instationäre Abkühlvorgang des Massivholzquerschnitts entspricht den Stunden 96 bis 106 in Abbildung 4.29. Auch hier fällt auf, dass unmittelbar nach dem Aktivieren des Betriebszustandes ‚Kühlen 16 °C‘ die größte Steigerung der Elementleistung zu verzeichnen ist. Gemessen an der Oberflächentemperaturänderung und bezugnehmend auf den stationären Zustand, der nach sechs Stunden als erreicht definiert wird, ergeben sich folgende Kennzahlen zur Beschreibung der Einschaltzeitverzögerung.

Bezogen auf die maximale Temperaturerhöhung im stationären Zustand werden ab dem Einschaltzeitpunkt:

- nach 30 Minuten 54,1 %,
- nach 60 Minuten 82,9 %,
- und nach 90 Minuten 90,3 %

der stationären Oberflächentemperaturerhöhung erreicht.

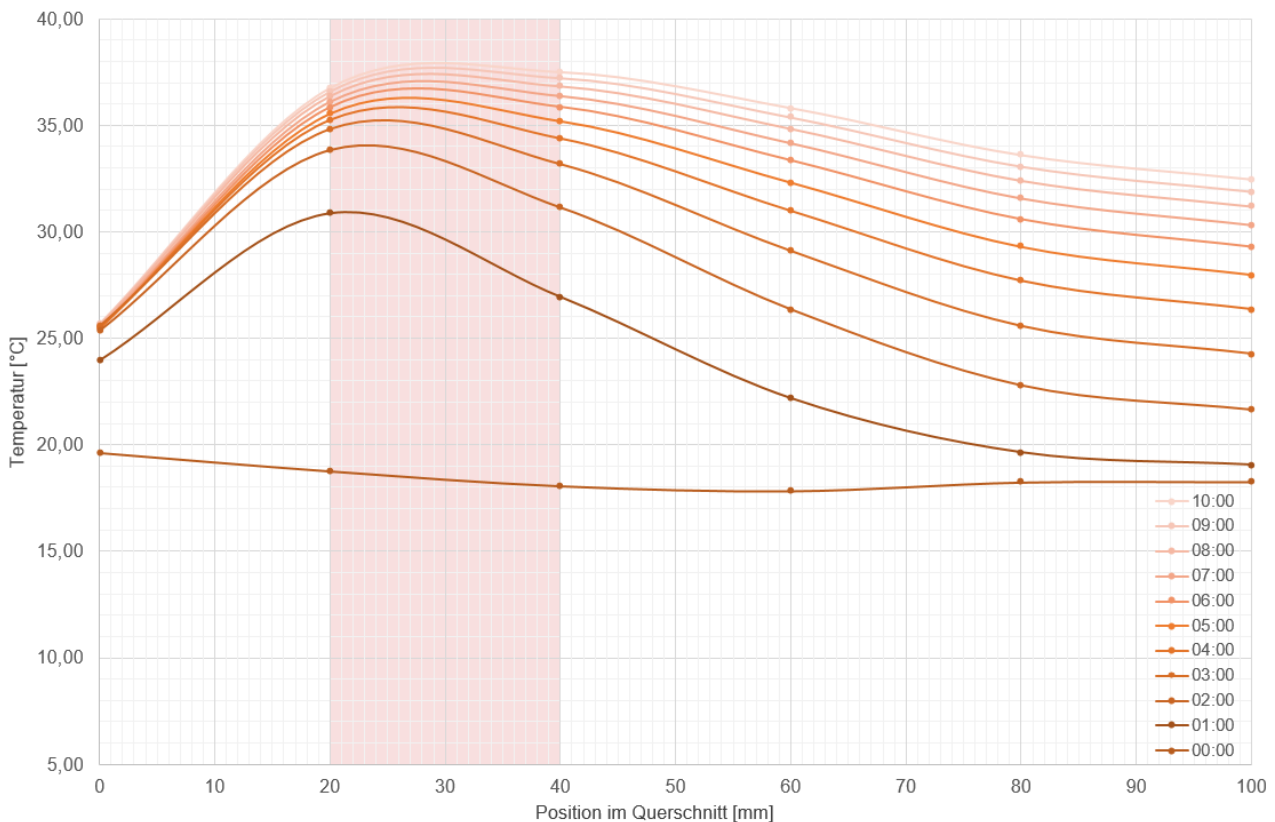


Abbildung 4.31: Zeitliche Änderung der Temperaturverläufe beim Umschalten von aktivem Kühlen auf aktives Heizen im Querschnitt des Massivholzelements die thermisch aktivierte Schicht ist hellrot markiert

Der in Abbildung 4.31 gezeigte instationäre Erwärmungsvorgang des Massivholzquerschnitts entspricht den Stunden 154 bis 146 in der Abbildung 4.29. Es wird der Vorgang des direkten Umschaltens von aktivem Kühlen mit einer VLT von 16 °C auf aktives Heizen mit einer VLT von 45 °C gezeigt. Zu Beginn des Versuchs war der Querschnitt auf eine annähernd gleichmäßige Temperatur zwischen 18 °C und 20 °C herunter gekühlt. Die Oberflächentemperatur des Elements beträgt zu diesem Zeitpunkt 19,6 °C.

Eine Stunde nach dem Umschalten auf aktives Heizen steigt die Oberflächentemperatur um 4,4 K. Der Temperaturhub im Querschnitt des Elements ist dagegen deutlich höher. An der Position 20 mm, also an der Schichtgrenze 1-2, wird das Holz in einer Stunde um 12,12 K erwärmt. Mit Blick auf die Energieeffizienz des Systems sollten derartige Lastwechsel durch prädiktive Regelungsstrategien womöglich vermieden werden. Denn anders als bei Abschaltungen kann die im Element gespeicherte Energie nicht für den wiederkehrenden Betrieb ‚weitergenutzt‘ werden, sondern es muss ein erhöhter ‚Umaktivierungsenergieaufwand‘ geleistet werden, bis die gewünschte Nutzenergie an den Raum abgegeben werden kann. Die Menge der Energie, die zum Durchwärmen des Querschnitts aufgewendet werden muss, ist proportional zu der von den Iso-Zeit-Linien eingeschlossenen Fläche.

Die Reaktionsgeschwindigkeit beim Umschalten vom Kühl- auf den Heizbetrieb fällt zu Beginn höher aus als vom ausgeschalteten Zustand auf den Heizbetrieb. Bezogen auf die maximale Temperaturerhöhung im stationären Zustand werden ab dem Umschaltzeitpunkt:

- nach 30 Minuten 47,7 %,
- nach 60 Minuten 71,60 %,
- und nach 90 Minuten 84,34 %

der stationären Oberflächentemperaturerhöhung erreicht. Dies kann mit der hohen Temperaturdifferenz zwischen dem Holzelement und der Systemluft nach dem Umschalten begründet werden. Nach einer Stunde gleicht sich die Reaktionsgeschwindigkeit der in Abbildung 4.28 gezeigten Erwärmung des Querschnittes an.

4.3.3 Materialfeuchte

In diesem Abschnitt werden die gemessenen instationären Materialfeuchtwerte der thermisch aktivierten Massivholzelemente im Kühl- und im Heizbetrieb illustriert. Es soll festgestellt werden, ob sich im Kühlbetrieb kritisch hohe Holzfeuchtwerte entwickeln und ob die erwartete geringe Holzfeuchte im Heizbetrieb zu Schwindrissen an der Oberfläche oder sonstigen Beeinträchtigungen führt. Aufgrund der begrenzt verfügbaren Messtechnik konnte eine permanente, stetige Messung der Holzfeuchte nur an Prototyp B durchgeführt werden. Der Prototyp B ist der leistungsorientierte der beiden Prototypen, bei dem die thermisch aktivierende Schicht in der zweiten Brettlamellenlage liegt. Es wird vermutet, dass die höhere Leistung des Prototyp B in Kombination mit der im Querschnitt asymmetrisch angeordneten Position den kritischeren Fall in Bezug auf mechanische Spannungen darstellt. Daher wird die Robustheitsbetrachtung des Prototyp B als repräsentativ für beide Prototypen angesehen. Im Folgenden soll auf die genannten Effekte im Kühl- und im Heizbetrieb eingegangen werden. Da der Kühlbetrieb wegen der erwarteten Aufweuchtung des Holzes als besonders kritisch eingeschätzt wird, wird der in Abbildung 4.32 mit $VLT = 16\text{ °C}$ markierte Zeitraum vom 29.05. bis zum 10.07. detaillierter betrachtet.

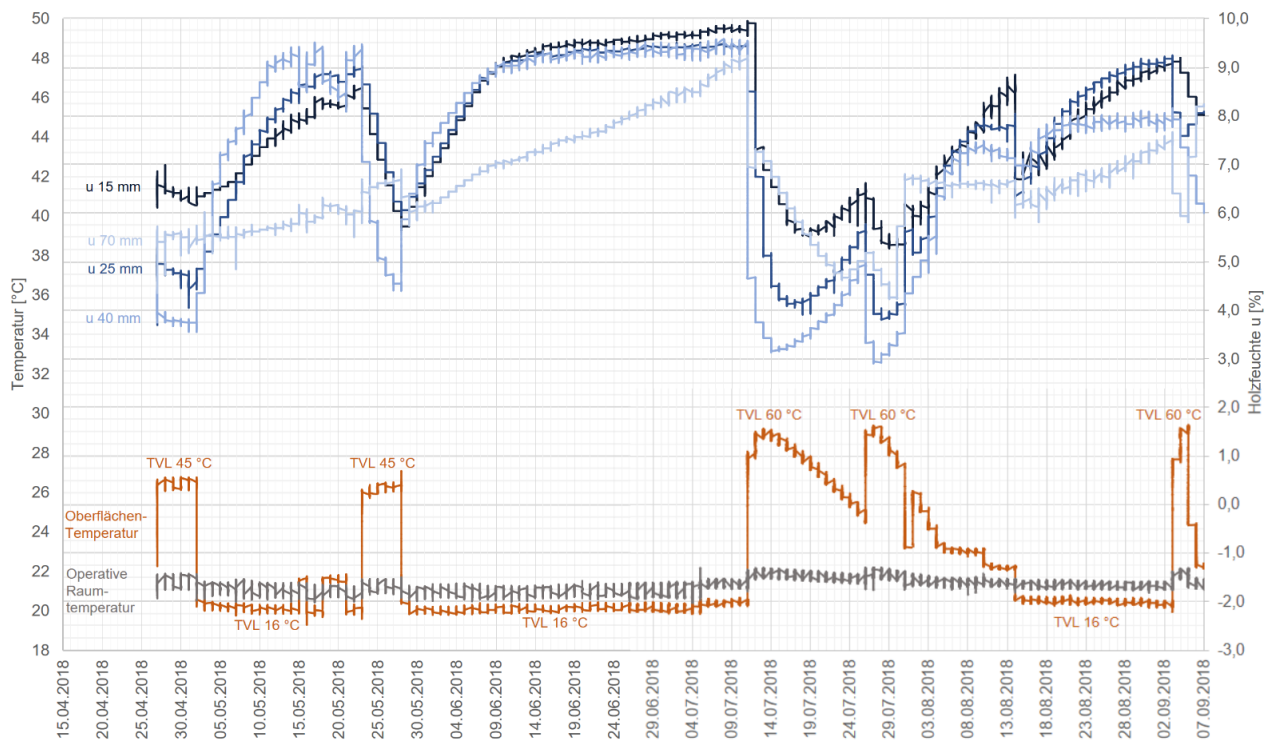
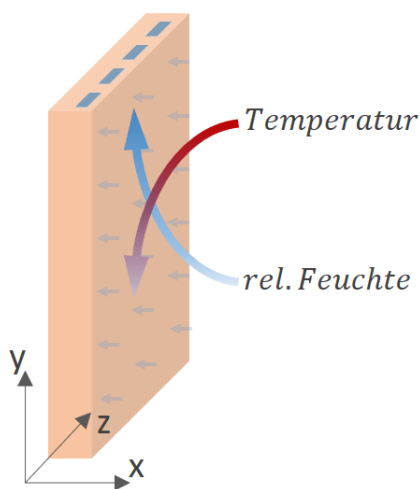


Abbildung 4.32: Materialfeuchteentwicklung im Kühlbetrieb

In der Abbildung 4.32 ist die Auswertung der Raumklima- und Materialfeuchtwerte über dem Zeitraum vom 25.04.2018 bis zum 07.09.2018 aufgetragen. Von besonderem Interesse ist das Kühl-szenario vom 29.05.2018 bis zum 10.07.2018, welches in der Abbildung 4.33 detailliert beschrieben ist. Die operative Raumtemperatur betrug in diesem Zeitraum $21,02\text{ °C}$ mit einer Standardabweichung von $0,24\text{ K}$. Auch die Temperatur der Raumluft lag in diesem Bereich und betrug $21,01\text{ °C}$ bei einer Standardabweichung von $0,19\text{ K}$.

Die relative Feuchte der Raumluft belief sich aufgrund der aktiven Befeuchtung des Laborraums auf 74,14 % bei einer Standardabweichung von 2,58 %. Die hohe Feuchtebelastung der Raumluft soll Erkenntnisse darüber liefern, wie schnell und wie hoch sich die Materialfeuchte des thermisch aktivierten Massivholzelements im Kühlbetrieb entwickelt. Um das Ausfallen von freiem Tauwasser an der Elementoberfläche auszuschließen, ist die minimal zulässige Temperatur im System durch die Taupunkttemperatur der umgebenden Raumluft bestimmt. Eine regelungstechnische Prämisse jedes Flächenkühlsystems ist die Berücksichtigung des Tauwasserkriteriums. Mit der folgenden empirischen Gleichung nach (Willems et al. 2012) lässt sich bei Kenntnis der relativen Feuchte und der Temperatur der Luft deren Taupunkttemperatur berechnen und als Limitierung der Kühlleistung setzen.



$$T_T = \frac{\varphi}{100 \%}^{0,1247} \cdot (109,8 + T_L) - 109,8 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4-4)$$

T_T	[°C]	Taupunkttemperatur der Raumluft
φ	[%]	Relative Luftfeuchte der Raumluft
T_L	[°C]	Temperatur der Raumluft

Aus den oben genannten Werten ergibt sich unter Anwendung der Formel (4-4) für den betrachteten Zeitraum einen mittlere Taupunkttemperatur von 16,21 °C. Aufgrund der geringen Standardabweichung der Raumlufttemperatur wird dieser Wert für den gesamten Kühlzeitraum als Grenzwert betrachtet.

Wie die obenstehende Abbildung andeuten soll, steigt die relative Feuchte der Raumluft bei sinkender Temperatur. Erreicht die Lufttemperatur deren Taupunkt, läuft die relative Feuchte gegen 100 %. Die steigende relative Feuchte der Raumluft kann allerdings nicht als unmittelbare kausale Erklärung für die Aufwechung des angrenzenden Holzes dienen. Der Grund für die steigende Sorption von Wasserdampf ist die mit sinkender Temperatur geringer werdende Energie der freien Wasserdampfteilchen, welche der anziehenden elektrostatischen Kraft der Holzmoleküle entgegensteht. Je geringer die Temperatur, desto mehr freie Wasserdampfmoleküle unterliegen der anziehenden Bindungskraft an die mikroskopische Holzoberfläche. Die Folge ist, dass sich bei Abkühlung von Luft und Oberfläche das thermodynamische Gleichgewicht zwischen Sorption und Desorption in den Bereich höherer Feuchte verschiebt. Parallel bestimmt die Wasserbelastung der Luft, gemessen in der absoluten Feuchte $x \left[\frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{Luft, tr}}} \right]$ bzw. dem Wasserdampfpartialdruck $P_D [\text{Pa}]$ sowie die bereits im Holz vorhandene Feuchte die Menge an sorbierbarem Wasser. In Abbildung 4.33 ist die Entwicklung der Holzfeuchteverläufe (oben) und die Entwicklung der Temperaturverläufe (unten) im Querschnitt während des 43-tägigen Kühlbetriebs dargestellt.

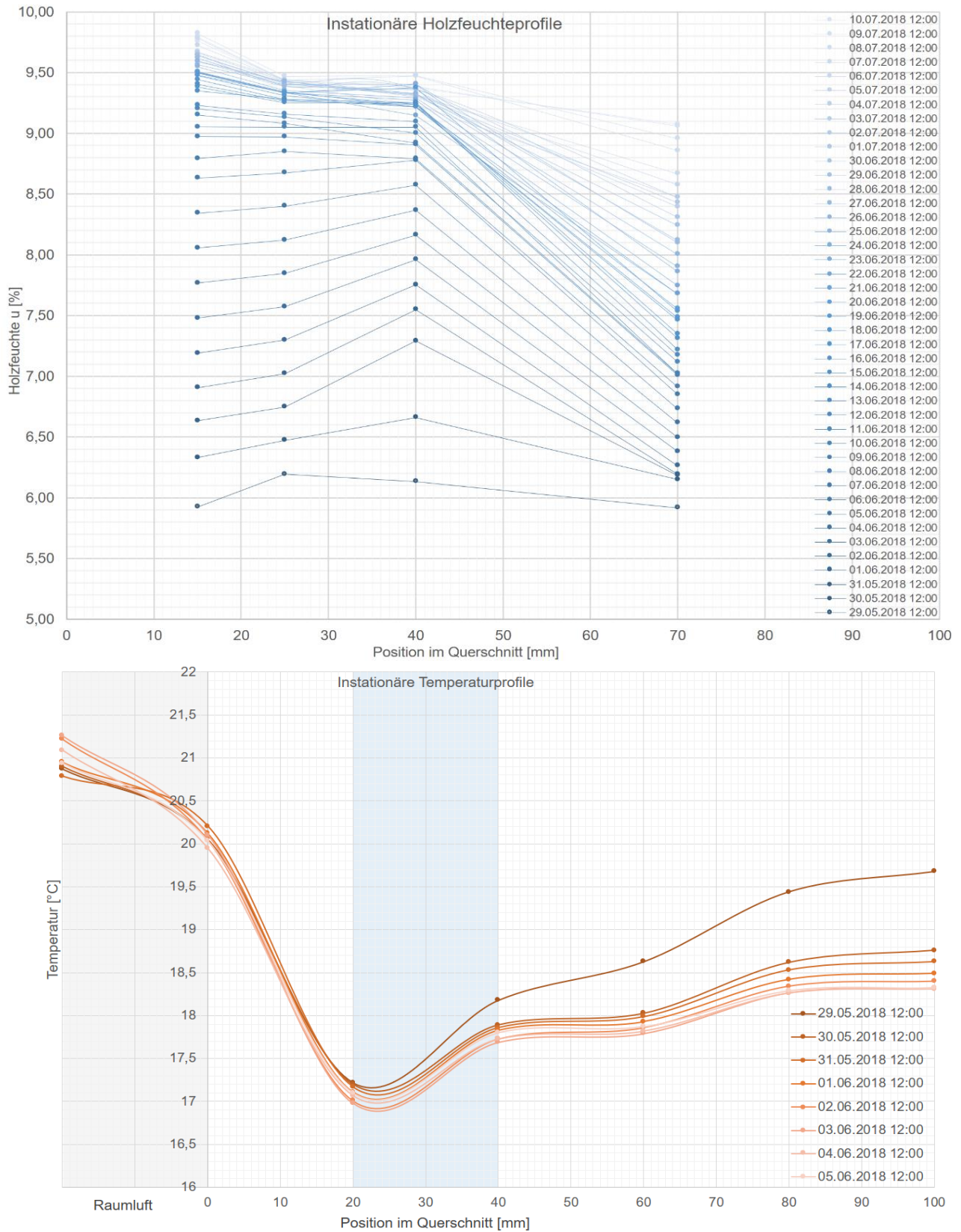


Abbildung 4.33: oben: Zeitliche Änderung der Holzfeuchte und unten: der Temperatur, während des Kühlbetriebs im Querschnitt des Massivholzelements, die aktivierte Schicht ist hellblau markiert

Die Abbildung 4.33 zeigt eine Auffeuchtung des Massivholzquerschnitts während des 43-tägigen Kühlbetriebs vom 29.05.2018 bis 10.07.2018. Das Ziel dieses Versuchsszenarios ist, möglichst Feuchte-kritische Bedingungen im Kühlbetrieb zu erzielen. Eine Vorlauftemperatur des thermisch aktivierten Elementes von 16,35 °C mit einer Standardabweichung von 0,32 K bewirkte eine mittlere Oberflächentemperatur von 20,14 °C bei einer Standardabweichung von 0,15 K. Daraus resultierte eine mittlere Wärmestromdichte von - 9,10 W/m² bei einer Standardabweichung von 1,73 W/m². Zu Beginn des betrachteten Zeitraums hat sich, wie die unterste blaue Linie zeigt, die Holzfeuchte relativ gleichmäßig über den Querschnitt verteilt und liegt im Bereich: 5,9 % < u < 6,2 %. In den ersten zwei Tagen nach dem Beginn des Kühlbetriebs ist die stärkste Anhebung der Holzfeuchte zu erkennen. Auffällig ist die parallele Anhebung des Feuchteprofils vom 29.05.2018 auf den 30.05.2018. Obwohl die Feuchtwerte um den Einfluss der Temperaturänderung bereinigt werden, lässt die nahezu parallele Anhebung des Feuchteprofils am ersten dargestellten Tag, insbesondere an der Position 70 mm vermuten, dass der Einfluss der Temperaturänderung nicht vollständig beseitigt wurde. Ab dem zweiten Tag tritt dieser Fehler nicht mehr in dem Maße auf, da die Temperaturen annähernd stationär werden, wie dem unteren Teil der Abbildung entnommen werden kann. Es wird angenommen, dass die dargestellten Feuchteverläufe nach Erreichen des stationären Temperaturprofils im Rahmen der Messunsicherheit den tatsächlichen Feuchteverläufen entsprechen. Deutlich erkennbar ist, dass der Anstieg der Holzfeuchte von der raumseitigen Oberfläche ausgeht. Dies entspricht der zuvor beschriebenen Theorie zur Feuchteaufnahme aus der Raumluft. In den ersten zwei Wochen nimmt die Holzfeuchte bis in eine Schichttiefe von 40 mm um knapp 0,2 % je Tag zu. Am 12.06.2018 beträgt die Holzfeuchte in 25 mm 9,2 % und in 40 mm Tiefe 9,0 %. Danach pendelt sie sich im Bereich um 9,5 % ein. Deutlich verzögerter tritt die Auffeuchtung in den tieferen Schichten ein. In den ersten zwei Wochen steigt die Holzfeuchte in 70 mm mit durchschnittlich 0,05 % je Tag auf einen Wert von 7,1 % am 12.06.2018. Erst am 10.07.2018 übersteigt die Feuchte des Holzes in 70 mm Tiefe die 9 %-Marke. Verglichen mit der vorherigen Einschätzung ist die Holzfeuchte trotz der hohen Raumluftfeuchte weniger stark angestiegen als erwartet. Ein Grund hierfür ist die geringe mittlere Kühlleistung an der Elementoberfläche von durchschnittlich - 9,1 W/m². Diese lag deutlich unter der Maximalleistung des Systems. Aufgrund des Taupunktkriteriums musste die Vorlauftemperatur wie oben beschrieben durch einen Minimalwert begrenzt werden. Höhere Leistungen sind möglich, bei höheren operativen Raumtemperaturen und geringeren relativen Luftfeuchten. Um aus den experimentell gewonnenen Erkenntnissen Schlüsse zur maximal möglichen Kühlleistung zu ziehen, soll im Rahmen einer simulationsgestützten Untersuchung in Kapitel 6.2 das Verhalten des Bauteils im Grenzbereich des Kühlbetriebs untersucht werden. So sollen direkte Leistungsgrenzen für das System gesetzt werden.

Im Folgenden wird der Heizbetrieb mit extrem geringen Holzfeuchtwerten illustriert. Gewählt wurde ein Zeitraum, in dem die relative Luftfeuchte des Labors geringer als im üblichen Laborbetrieb eingestellt werden konnte. In der Zeit zwischen dem 16.12.2017 und dem 21.01.2018 betrug die relative Luftfeuchte im Mittel 55,36 %. Eine hohe Standardabweichung von 11,5 % resultiert aus mehreren Stromausfällen im Labor zwischen und nach den Feiertagen. Die mittlere operative Raumtemperatur betrug 21,61 °C bei einer Standardabweichung von 0,47 K. Die Temperatur der Luft betrug 21,13 °C und schwankte mit 0,65 K. Die Vorlauftemperatur betrug im Mittel 43,26 °C.

Aus demselben Grund wurde der regelmäßige Betrieb kurzzeitig unterbrochen, was sich in einer Standardabweichung von 5,17 K widerspiegelt. Die mittlere Oberflächentemperatur lag, wie in Abbildung 4.34 gezeigt, ca. 5 K über der operativen Raumtemperatur. Sie schwankte mit 0,96 K.

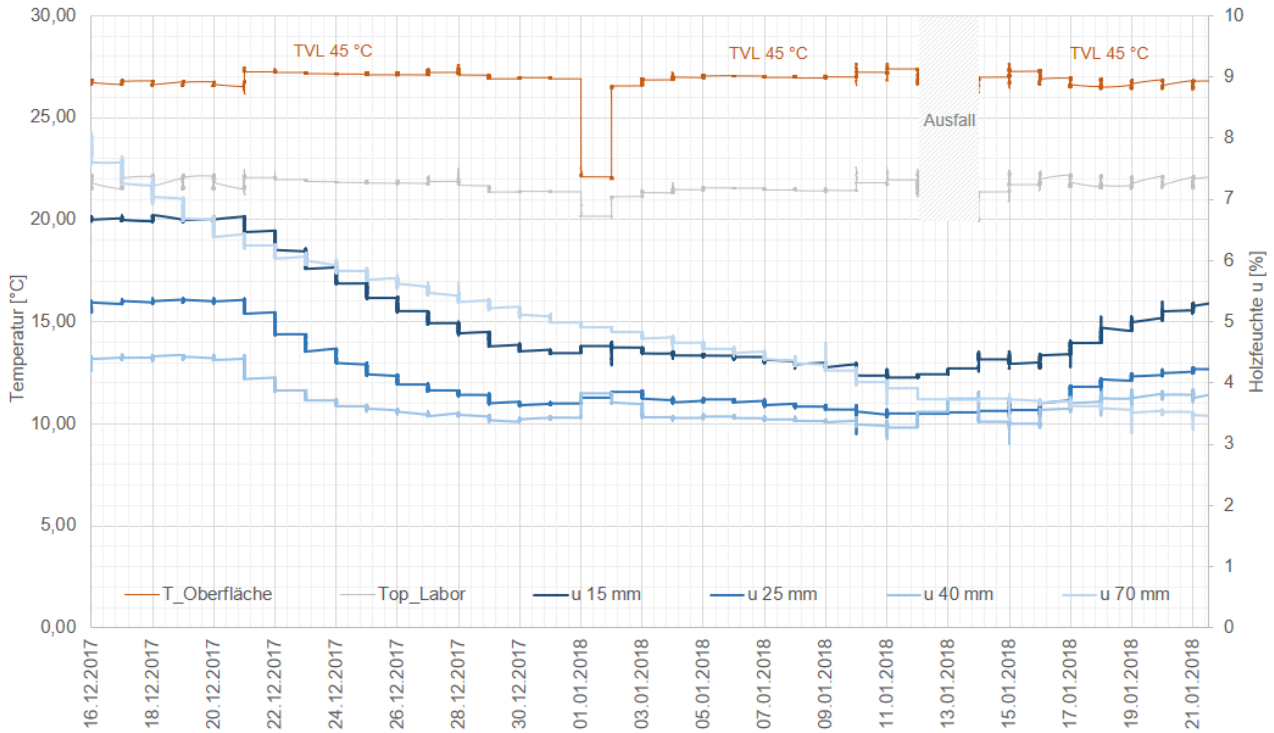


Abbildung 4.34: Materialfeuchteentwicklung im Heizbetrieb an Prototyp B

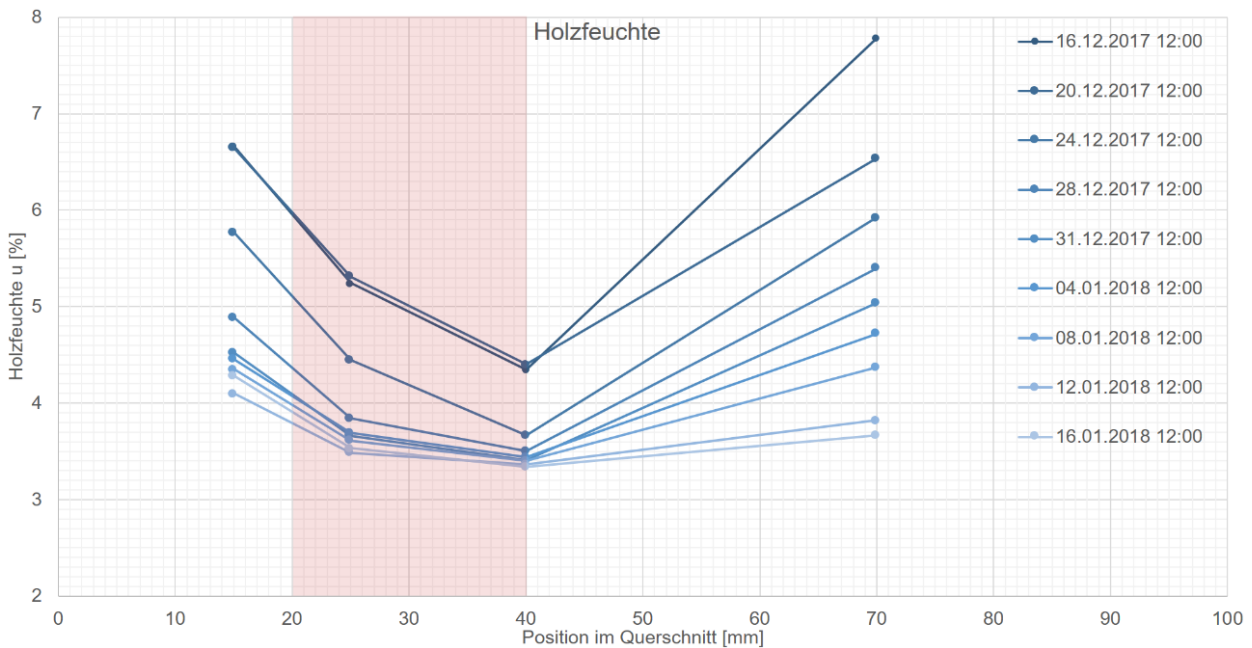


Abbildung 4.35: Zeitliche Änderung der Holzfeuchte während des Kühlbetriebs im Querschnitt des Massivholzelements, die aktivierte Schicht ist hellrot markiert

In Abbildung 4.34 sind unter der mittleren Oberflächentemperatur und der operativen Laborraumtemperatur die vier Holzfeuchteverläufe über der Zeit beschrieben und in Abbildung 4.35 räumlich im Querschnitt aufgelöst abgebildet. Da die vom Hersteller des Holzfeuchtemesssystems angegebene Messunsicherheit für Werte $u > 6\%$ gilt, soll die Darstellung des Bereichs unter 6% Holzfeuchte nur orientierend interpretiert werden.

Eine an den genannten Zeitraum des Heizversuchs unmittelbar anschließende visuelle Untersuchung der Oberfläche des Massivholzelements hat ergeben, dass keine Risse in der Oberfläche aufgetreten sind. Es wird wie bei der Bewertung des Prototyp A darauf hingewiesen, dass die Untersuchung nicht bei extrem trockenem Umgebungsklima stattgefunden hat. Eine Bewertung des Quell- und Schwindverhaltens für den extrem trockenen Winterfall kann erst ein Langzeittest in einer extrem trockenen Umgebung bringen.

Gegen Ende des langzeitigen Laborversuchs wurde Prototyp B in einen Extremzustand der thermischen Leistung gebracht. Durch einen Heizbetrieb mit $VLT = 60\text{ °C}$ direkt im Anschluss an den oben diskutierten 43-tägigen Kühlversuch mit $VLT = 16\text{ °C}$ soll eine starke Abnahme der Holzfeuchte an der Oberfläche erreicht werden. Dieses Szenario beginnt in Abbildung 4.32 ab dem 11.07.2018. Die dort gezeigten Verwerfungen der Holzfeuchteverläufe von 10% auf unter 4% innerhalb weniger Tage sind zum einen teilweise durchsetzt von Temperatureinflüssen und zum anderen im Bereich der Holzfeuchte $u < 6\%$. Daher sollen die Werte wieder nur orientierend verstanden werden und dieses Mal nicht detailliert im Querschnitt aufgetragen werden. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass dieses Szenario hohe Holzfeuchtegradienten in das Element induziert hat. Eine Untersuchung der Oberfläche auf Schwindrisse kann diese Vermutung bestätigen.



Abbildung 4.36: Untersuchung der Oberfläche auf Schwindrisse am 18.07.2018

Bei der Untersuchung ist ein ca. 450 mm langer und $0,3\text{ mm}$ breiter Riss an der Oberfläche entstanden, der sich nach Beendigung des Heizbetriebs wieder verschlossen hat.

Vermutlich war neben der abklingenden Temperatur ein weiterer Grund für das Verschließen des äußeren Risses, dass nach einigen Tagen auch die innenliegenden Schichten sich der von außen aufgeprägten geringen Holzfeuchte angeglichen und somit den hohen Feuchtegradienten abgebaut haben. In den übrigen Versuchen des Prototyp B und bei sämtlichen Versuchen an Prototyp A sind bei regelmäßigen Oberflächenuntersuchungen keine Schwindrisse aufgetreten.

Abschließend soll auf die Überprüfung der Ungenauigkeit der Holzfeuchtemessungen mittels elektrischer Widerstandsmessung eingegangen werden. Normativ ist die Bestimmung der Holzfeuchte in DIN EN 13183 geregelt. Die Norm unterscheidet die drei Verfahren:

- Teil 1: Bestimmung des Feuchtegehalts durch das Darrverfahren.
- Teil 2: Die Schätzung des Feuchtegehalts durch das elektrische Widerstands-Messverfahren.
- Teil 3: Die Schätzung der Holzfeuchte durch das kapazitive Messverfahren.

Das Verfahren zur Bestimmung des Feuchtegehalts durch das Darrverfahren nach Teil 1 der DIN EN 13183 soll, wie in der Abbildung 4.37 dokumentiert, zur Überprüfung des Verfahrens zur Schätzung des Feuchtegehalts durch das elektrische Widerstands-Messverfahren nach Teil 2 der Norm herangezogen werden.

Da der prototypische Probekörper B bei der Bestimmung des Feuchtegehalts durch das Darrverfahren zerstört wird, erfolgte die Messung nach Beendigung der Langzeitlaborversuche gegen Ende September 2018.

Tabelle 4-3: Vergleich zwischen den beiden Verfahren zur Bestimmung bzw. Schätzung der Holzfeuchte nach dem Darr- und dem elektrischen Widerstands-Messverfahren

		28.09.2018 15:45-16:15	28.09.2018 16:30	Abweichung absolut	Abweichung relativ
Messung	aus Position	u [%] el. Messung	u [%] Darrtrocknung	u [%]	[%]
1	Mittlere Höhe, Steg 6, 15 mm	7,40%	9,35%	-1,95%	-26,36%
2	Mittlere Höhe, Steg 6, 25 mm	9,00%	8,25%	0,75%	8,30%
3	Mittlere Höhe, Steg 6, 40 mm	8,20%	8,43%	-0,23%	-2,84%
4	Mittlere Höhe, Steg 6, 70 mm	8,50%	9,70%	-1,20%	-14,12%
			Mittelwert	-0,66%	-8,76%

Die Ergebnisse zeigen eine mittlere Abweichung zwischen den Ergebnissen der beiden Verfahren von $\Delta u = -0,66\%$ -Holzfeuchte bzw. einer relativen Abweichung von $-8,76\%$ des Messwertes.

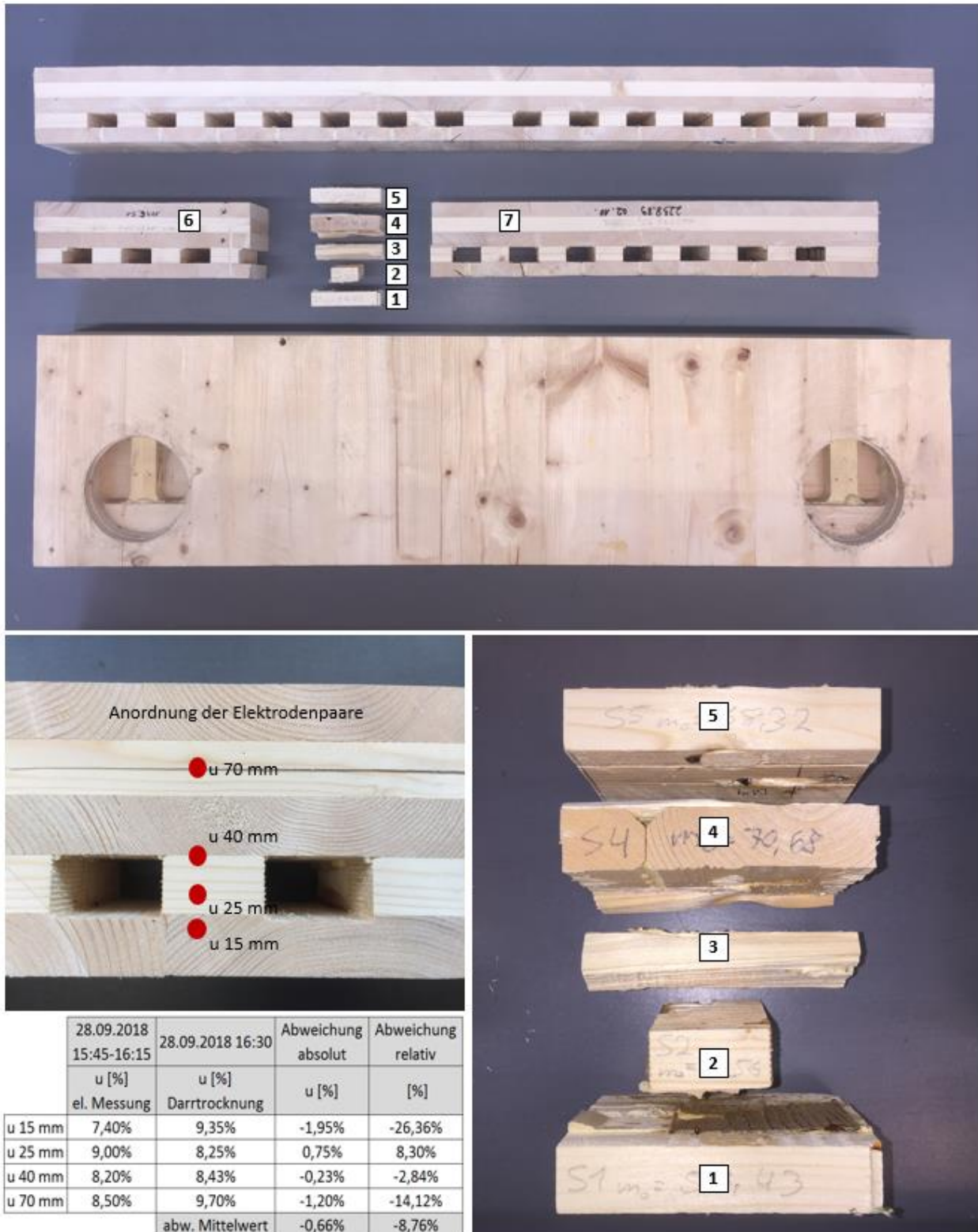


Abbildung 4.37: Vergleich der Holzfeuchtebestimmung durch das Darrtrocknungsverfahren und das elektrische Widerstandsverfahren an Prototyp B

4.3.4 Aerodynamische Analyse

Zur Bestimmung des Volumenstroms im Systemluftkreis wurde eine Messung auf der Saugseite des Ventilators durchgeführt. In Abbildung 4.38 ist die Position zur Bestimmung des Systemluft-Volumenstroms dokumentiert.

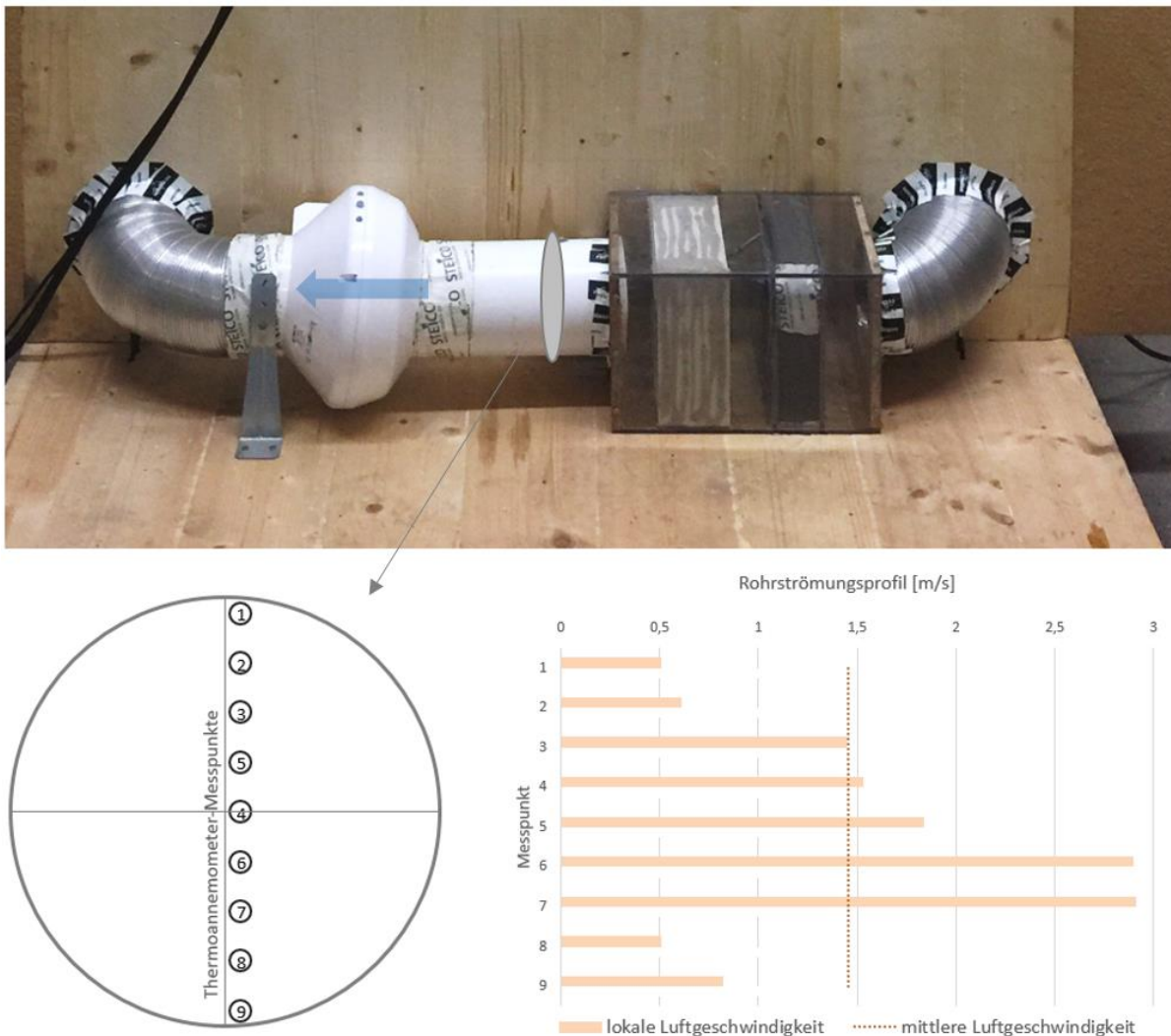


Abbildung 4.38: Bestimmung des Volumenstromes im Systemluftkreislauf bei Prototyp B

Um diesen zu bestimmen, kann aufgrund des unsymmetrischen Strömungsprofils der vereinfachte Ansatz mittels einfacher Messung und Strömungsprofilfaktor nicht angewendet werden. Für den vereinfachten Ansatz wäre eine ungestörte Strömungsweglänge von $5 \times D_i$ vor und $3 \times D_i$ nach der Messung notwendig. Wie in der oben gezeigten Abbildung zu sehen, steht für die Messung des Volumenstroms lediglich das gerade Rohrstück zwischen der Luftkonditionierungseinheit und dem Ventilator zur Verfügung. Es wurden mehrere diskrete Messungen, verteilt über den Querschnitt des Lüftungsrohres, unternommen und zu einer resultierenden mittleren Luftströmungsgeschwindigkeit verrechnet. Somit konnte auf den Ansatz des Strömungsprofilfaktors verzichtet werden. Für die Versuche an Prototyp B ergibt sich eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 1,45 m/s.

Hiermit kann durch Multiplikation mit dem lichten Rohrquerschnitt des DN125 Rohres der Volumenstrom zu $64,2 \text{ m}^3/\text{h}$ berechnet werden. Während der Versuche wird der Volumenstrom nicht verändert. Die Messgenauigkeit des verwendeten Thermoanemometers wird vom Hersteller mit 3 % angegeben (KIMO Instruments).

Als nächstes wird das Luftströmungsfeld im Inneren des thermisch aktivierten Massivholzelements untersucht. In der Abbildung 4.39 sind die Datenpunkte der aerodynamischen Messungen dokumentiert.

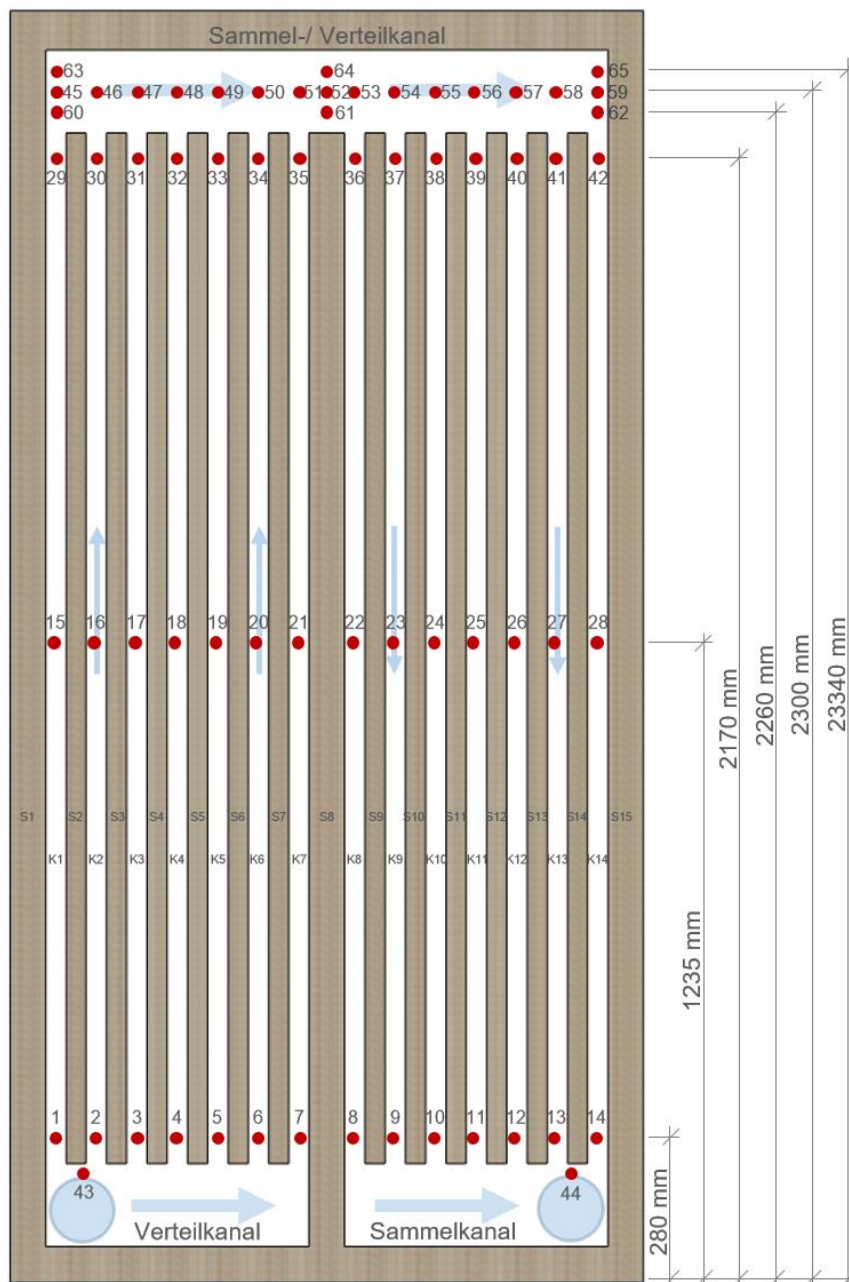


Abbildung 4.39: Aerodynamische Messpunkte zur Bestimmung des statischen und kinetischen Drucks

Gemessen wurden an insgesamt 65 Positionen der statische Druck im Kanalsystem gegenüber der Umgebung sowie die Luftgeschwindigkeit in Kanalmitte jeweils längs und quer zur Kanalhaupt- richtung. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.40 und Tabelle 4-4 aufgetragen.

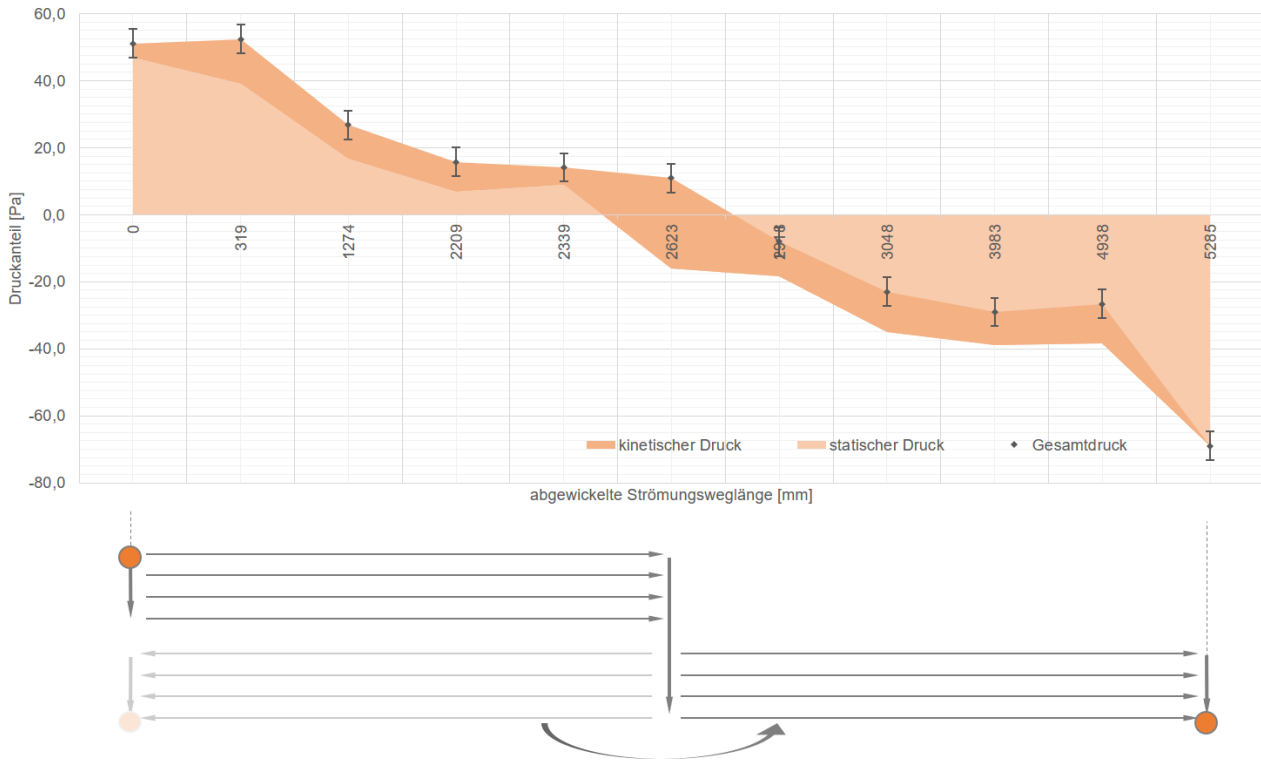


Abbildung 4.40: Messung des kinetischen und statischen Druckströmungsfeldes in Prototyp B

Für die obige Darstellung wurden aus den Längsgeschwindigkeiten die kinetischen Drücke ermittelt und neben den statischen Druckanteilen über der abgewickelten Strömungsweglänge aufgetragen.

Tabelle 4-4: Messwerte des kinetischen und dynamischen Drucks an Prototyp B am 14.08.2018

Messung	Position	Höhe	Lauflänge	P_stst	v_längs	v_quer	P_kinetisch	P_ges
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[Pa]	[m/s]	[m/s]	[Pa]	[Pa]
43	Einlass	195	0,0	47,0	2,6	-	4,1	51,1
1 bis 7	K_1-7	280	318,9	39,1	4,6	0,0	13,3	52,4
15 bis 21	K_1-7	1235	1273,9	16,7	4,0	0,0	10,1	26,8
29 bis 35	K_1-7	2170	2208,9	6,9	3,8	0,0	8,9	15,8
45 bis 51	S/V-K	2300	2338,9	8,9	2,2	0,9	5,2	14,1
53	S/V-K	2300	2622,5	-16,0	6,7	0,4	26,9	10,9
53 bis 59	K_1-7	2300	2917,5	-18,4	3,8	0,3	10,3	-8,1
36 bis 42	K_8-14	2170	3047,5	-35,0	4,3	0,0	12,0	-23,0
22 bis 28	K_8-14	1235	3982,5	-39,0	3,9	0,0	10,0	-29,0
8 bis 14	K_8-14	280	4937,5	-38,3	4,3	0,0	11,7	-26,6
44	Auslass	195	5285,0	-69,0	0,3	0,4	0,0	-69,0

Nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik bleibt die Menge an Energie in einem geschlossenen System stets konstant, jedoch kann die Energie innerhalb des Systems ihre Form ändern.

Die Bernoulli'sche Druckgleichung ist eine Anwendung dieser physikalischen Gesetzmäßigkeit. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen den einzelnen Anteilen des Gesamtdrucks unter Anwendung des Energieerhaltungssatzes. Ergänzt wird der reale Verlustterm $\Delta P_{Verlust}$ zur Beschreibung der Reibungsdruckverluste im Kreislauf der Systemluft.

$$P_1 + \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{\rho}{2} \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \Delta P_{Verlust} \quad [\text{Pa}] \quad (4-5)$$

$P_{1,2}$	[Pa]	Lokaler statischer Druck
ρ	[kg/m ³]	Dichte des Fluids
$v_{1,2}$	[m/s]	Lokale Geschwindigkeit des Fluids
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
$h_{1,2}$	[m]	Geodätische Höhe
$\Delta P_{Verlust}$	[Pa]	Druckverlust, beispielsweise durch Reibung

Die Gleichung erlaubt die reversible wechselseitige Umwandlung von dynamischem in statischen Druck¹⁴. Wird der Strömungsweg verjüngt, erhöht sich die lokale Geschwindigkeit und mit ihr der dynamische Druck. Die dafür notwendige Energie stammt aus dem statischen Druckanteil. In Bereichen mit konstantem dynamischem Druck und fallendem statischem Druck wird Druckenergie für die Überwindung von Reibungsverlusten aufgewendet. So lässt sich der in Abbildung 4.40 gezeigte Strömungsweg des Systemluftkreislaufs bezüglich Optimierungen der Druckverluste analysieren. Je höher der dynamische Anteil des Drucks an einer Stelle ist, desto höher die lokale Geschwindigkeit der Luft. Geschwindigkeitsmaxima im Strömungsweg sind nicht immer alleine durch geometrische Querschnittsverjüngung bedingt. Ein Beispiel hierfür ist die Position 53 im Scheitelpunkt des Elements ganz oben mittig. Dort erreicht die Luft die höchste Geschwindigkeit im Systemluftkreislauf. Der Grund für diese hohe Geschwindigkeit ist eine Bündelung der waagerechten Strömungslinien, bedingt durch den kinetischen Impuls der insbesondere aus Kanal 7 (K7) aufwärts strömenden Luft.

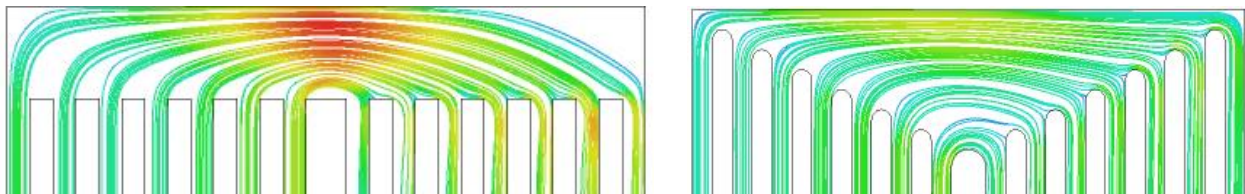


Abbildung 4.41: Strömungslinienvisualisierung in den Übergängen der Vertikalkanäle; links: Prototyp B, rechts Optimierungsvorschlag; in Anlehnung an: (Ertl 2019)

¹⁴ Eine reale Druckumwandlung ist stets irreversibel und an die Entstehung von Entropie gekoppelt.

Der statische Druck im Scheitelbereich ist, wie in Abbildung 4.40 gezeigt, annähernd Null, da lokal zum einen viel Energie in der dynamischen Komponente des Drucks steckt und zum anderen gerade hier der neutrale Bereich des Systemluftkreislaufs liegt. Der vom Ventilator aufgebaute, statische Druck ist bis zum Scheitel des Elements durch Reibungsverluste abgebaut. Die gesamte zweite Hälfte des Elements liegt im Sogbereich des Ventilators. Mit strömungstechnischen Optimierungen, wie in Abbildung 4.41 gezeigt, lassen sich Kanalreibungsdrukverluste erheblich reduzieren. Bei einer Reduzierung der Reibungsdrukverluste können in gleichem Maße die hydraulische und elektrische Leistung des Ventilators verringert werden. Der so reduzierte Hilfsenergieaufwand führt wiederum zu einer primärenergetischen Verbesserung des Gesamtsystems.

Der geodätische Druckanteil wird aufgrund der geringen vertikalen Elementlänge in dieser Anwendung nicht betrachtet. Die Messunsicherheit wird mit dem Fehlerquadrat der beiden vom jeweiligen Messgeräthersteller angegebenen Einzelunsicherheiten von je 3 Pa angegeben und beträgt 4,24 Pa. Die dem Diagramm zugrundeliegenden Messwerte können der Tabelle 4-4 entnommen werden.

Zur detaillierten Analyse und Erarbeitung weiterer Optimierungen wurde im Rahmen einer Masterarbeit (Ertl 2019) eine Strömungssimulation des Systems mit der Simulationssoftware Ansys CFX durchgeführt. Zur Validierung des Simulationsmodells wurden u. a. folgende Vergleiche angestellt. In Abbildung 4.42 sind jeweils der lokale statische Druck und die lokale Geschwindigkeit in der links dargestellten Falschfarbenlegende abzulesen.

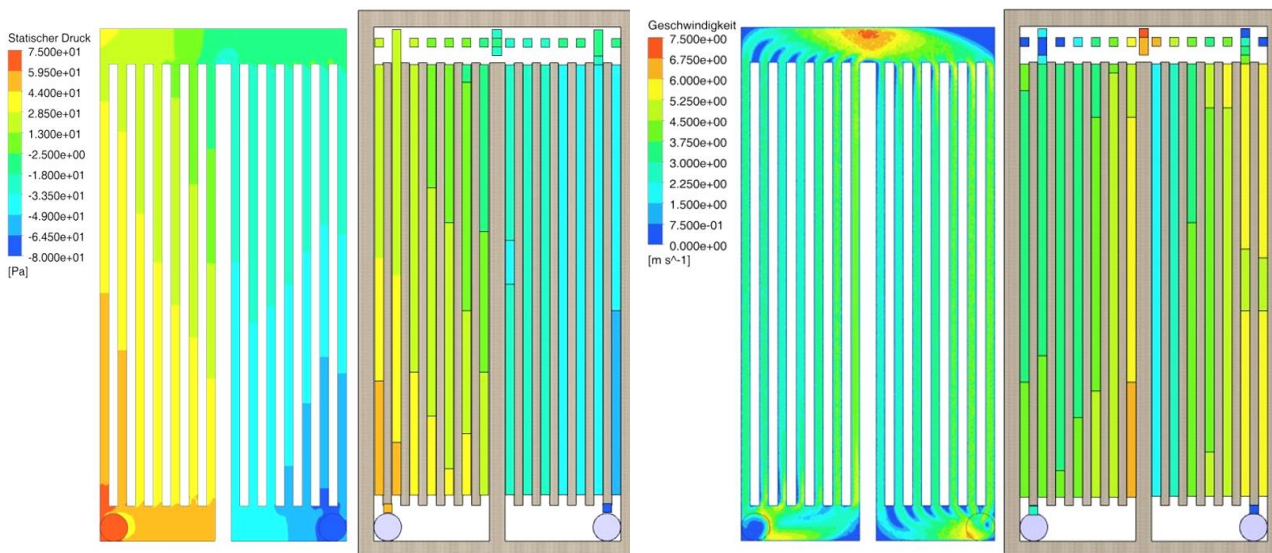


Abbildung 4.42: Vergleiche von Simulation und Messdaten; äußerst links: Simulation des statischen Drucks; Mitte-Links: Messung des statischen Drucks; Mitte-Rechts: Simulation der Geschwindigkeiten; rechts: Messung der Geschwindigkeiten; in Anlehnung an: (Ertl 2019)

Nach einigen Verbesserungen des dreidimensionalen numerischen Berechnungsgitters sowie der Annahmen zu den Systemgrenzen der Berechnung erreichen simulierte und gemessene Verläufe eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Eine detaillierte Dokumentation der Validierung kann (Ertl 2019) entnommen werden.

In der folgenden Abbildung sind das Ergebnis der strömungstechnischen Optimierung aus (ebd.) und einige weitere bisher unbewiesene Optimierungsvorschläge aufgetragen.

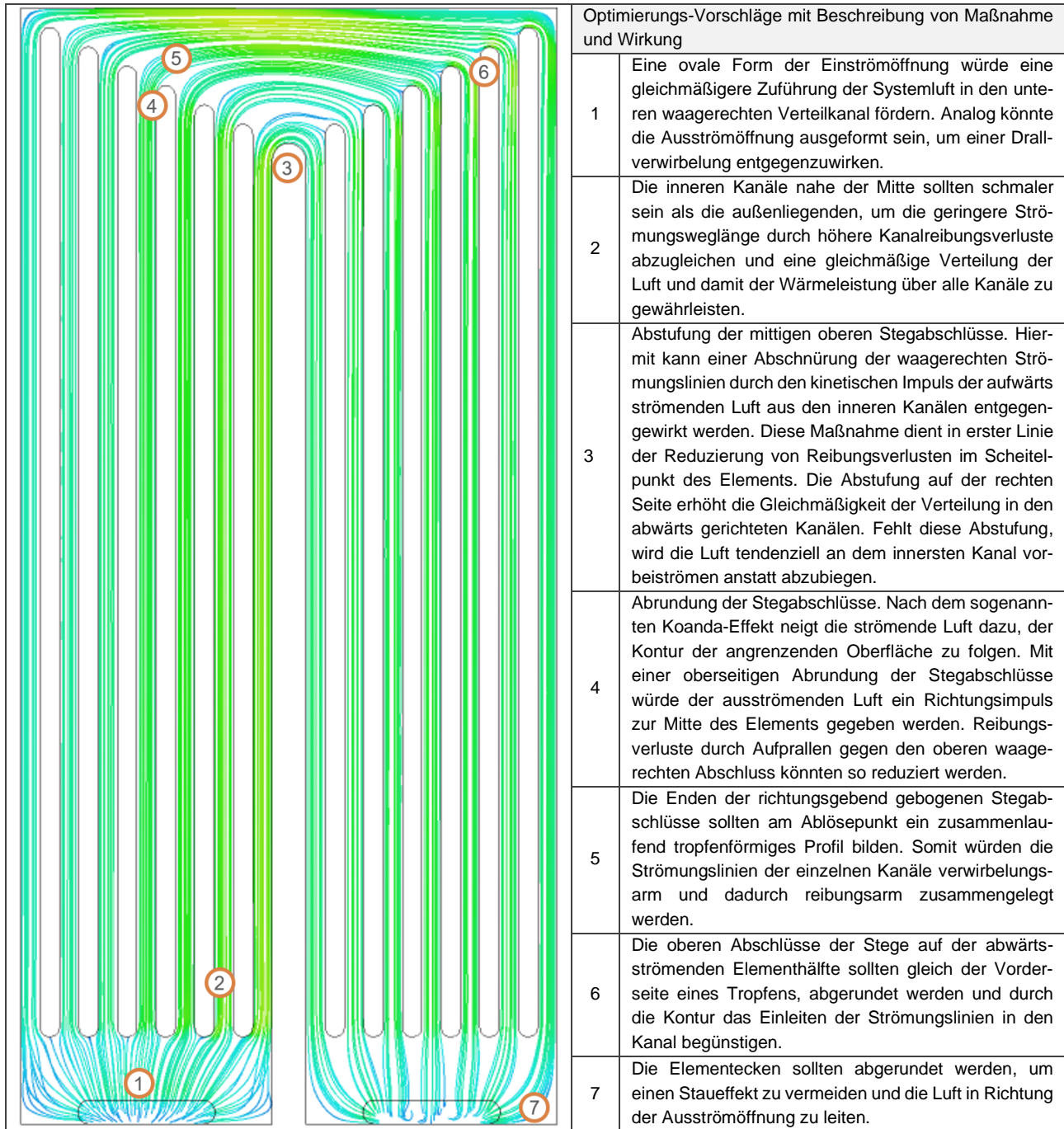


Abbildung 4.43: Stromlinienvisualisierung des optimierten Aufbaus aus (Ertl 2019) mit Ergänzung weiterer unbewiesener Optimierungsvorschläge (qualitative Falschfarbendarstellung des dynamischen Drucks entlang der Strömungslinien)

Die genannten Hypothesen sollen Anregungen für weitere, auf dieser Arbeit aufbauende Systemoptimierungen liefern.

5 Berechnungsansätze zur Beschreibung der thermischen Leistung

5.1 Praxisübliche Berechnung und Auslegung von Flächenheiz- und Kühlsystemen

5.1.1 Allgemein

Kapitel 5 soll Verfahren liefern, mit denen die Leistung von thermisch aktivierten Massivholzelementen berechnet werden kann. Die Entwicklung dieser Verfahren unterliegt der Zielsetzung einer schnellen Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis. Das entwickelte numerische Modell soll eine hinreichend genaue Abbildung des thermisch aktivierten Massivholzelements beinhalten, um Systemoptimierungen im Rahmen einer Produktentwicklung im Nachgang dieser Arbeit zu ermöglichen. Darüber hinaus soll das numerische Modell für die planerische Anwendung Kennwerte der stationären Auslegung im Diagrammverfahren liefern und bei einer Auslegung mittels Jahres-simulation direkt als Berechnungsmodellvorlage dienen.

In den folgenden Abschnitten sollen zunächst die beiden letztgenannten Ziele näher betrachtet werden. In Abschnitt 5.1.2 wird die Systematik der stationären Auslegung von Heizsystemen nach den aktuell anerkannten Regeln der Technik beschrieben. Nach den Erläuterungen soll definiert werden, welche Informationen ein stationäres Auslegungswerkzeug für thermisch aktivierte Massivholzelemente benötigt. Analog werden Anwendungsfälle und das Vorgehen für die instationäre Auslegung in behandelt. In den Abschnitten 5.2 und 5.3 werden Angaben zum Aufbau und zur Ungenauigkeit des Berechnungsmodells gemacht und einige Optimierungsvorschläge für den Bau von weiteren prototypischen Probekörpern unterbreitet.

5.1.2 Stationäre Ansätze zur Auslegung von Flächenheiz- und Kühlsystemen

Das Anwendungsspektrum von stationären Auslegungsverfahren betrifft nach aktuellem Stand der Technik die Projektierung von Heizsystemen. Das maßgebende Auslegungsziel von Heizsystemen ist, bei einer gewünschten Innenraumlufttemperatur und einer für den jeweiligen Standort normativ vorgegebenen Auslegungs-Außenlufttemperatur, die konvektiven und transmissiven Wärmeverluste eines Raumes bzw. des Gebäudes durch seine thermische Hüllfläche auszugleichen. Aufgrund eines großen Temperaturgefälles zwischen dem Gebäudeinneren und der Außenluft kann im Auslegungsfall ein annähernd stationärer Wärmestrom durch die Gebäudehülle angenommen werden. Der instationäre Effekt von thermischen Speichermassen ist in der stationären Normheizlastberechnung allenfalls durch einen Aufheizaufschlag berücksichtigt, der eine temporär erhöhte Heizleistung bei der instationären Aufheizung, beispielsweise nach einer Nachtabenkung, berücksichtigt. Mit den Berechnungsergebnissen der Normheizlast nach DIN EN 12831 erfolgt die systemspezifische Auslegung der notwendigen Heizleistung. Diese ist in DIN EN 1264 bzw. zukünftig der DIN EN ISO 11855 geregelt. Das Vorgehen und die Berechnungselemente bei der stationären Auslegung von Heizsystemen sind in Abbildung 5.1 illustriert.

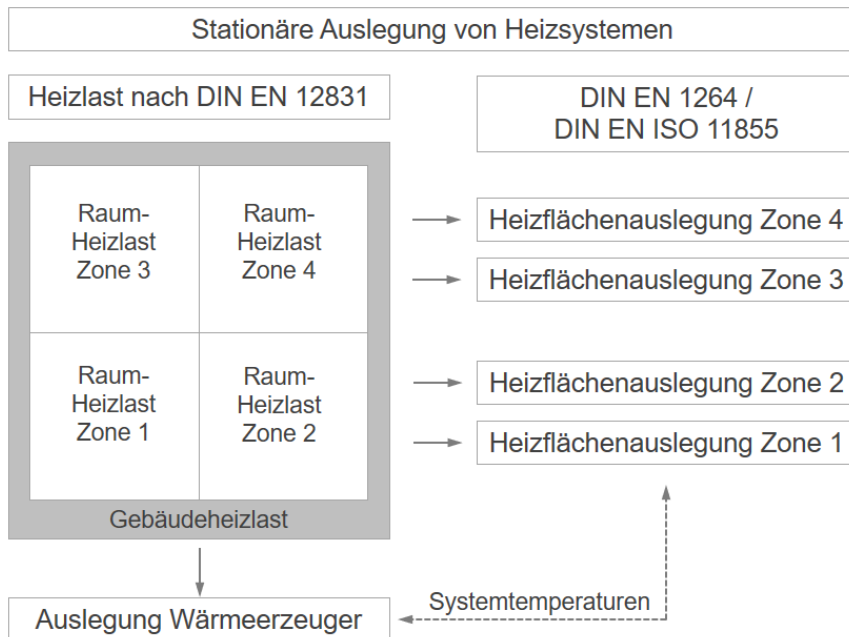


Abbildung 5.1: Vorgehen bei der stationären Auslegung von Heizsystemen

Zuerst wird die notwendige Heizlast des Gebäudes berechnet. Diese hängt von den Eigenschaften der Baustruktur ab und wird in der physikalischen Dimension einer thermischen Leistung in [W] bzw. [kW] angegeben. Die Ergebnisse der Heizlast sind die Grundlage für die Dimensionierung der technischen Systeme. Entsprechend der DIN EN 12831 werden die folgenden Elemente in der stationären Berechnung der Heizlast berücksichtigt.

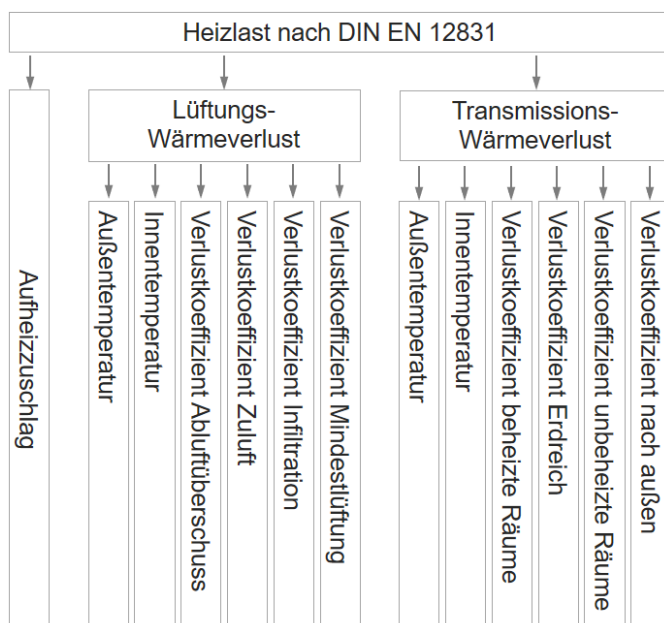
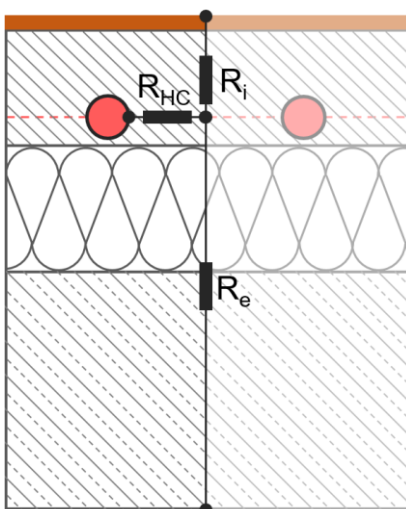


Abbildung 5.2: Systematik der stationären Berechnung der Raum- bzw. Gebäudeheizlast

Die Gebäudeheizlast dient, zusammen mit der Trinkwassererwärmungsleistung und etwaigen sonstigen Wärmebedarfen, der Auslegung des Wärmereizers. Dieser wird konzeptuell auf die Technologie der Raumheizsysteme angepasst. Bereits in der Entwurfsplanung, vor der eigentlichen Auslegung des Heizsystems, muss die Kompatibilität zwischen dem Wärmereizer und den Raumheizflächen definiert werden. Insbesondere die Systemtemperaturen des Wärmereizers müssen definiert sein, denn sie müssen ausreichen, um das Raumheizsystem betreiben zu können. Während Flächenheizsysteme mit moderaten Vorlauftemperaturen nahe der Raumtemperatur funktionieren, erfordern Konvektoren oder Radiatoren kleinerer Bauart ein deutlich höheres Temperaturniveau, um die Wärme in ausreichender Menge an den Raum abgeben zu können. Die zonale Raumheizlast ist die Bemessungsgrundlage für die Auslegung der einzelnen Heizflächen pro Raum. Je nach zur Verfügung stehender, freier Boden- oder Wandfläche wird die flächenbezogene notwendige Heizleistung in W/m^2 -Systemfläche bestimmt, die dann für die Parametrierung des Flächenheizsystems angesetzt wird.

Die Berechnung der systemspezifischen Heizleistung ist in der europäischen Normenreihe DIN EN 1264 geregelt. Künftig soll die seit vielen Jahren etablierte Normenreihe durch die internationale Norm DIN EN ISO 11855 ersetzt werden. Beide Normen beschreiben detailliert, wie die Bestimmung der Heizleistung eines spezifischen Systems durchgeführt werden soll. Parameter bei der Projektierung von bauteilintegrierten Flächenheiz- und -Kühlsystemen sind:

- der Verlege-Abstand zwischen den Rohren,
- der Wärmeübergang vom Fluid auf das Rohr und vom Rohr auf das umgebende Material,
- der thermische Widerstand zwischen der raumseitigen Oberfläche und der Lage der Rohre,
- der thermische Widerstand zwischen der Lage der Rohre und der Bauteilrückseite,
- der Massenstrom durch die Rohre,
- die Fließweglänge einer Schleife und
- das Vorlauf- und Rücklauf temperaturniveau des wärmeübertragenden Fluids.



Modellbeschreibung: thermische Widerstände

R_{HC} : Berücksichtigt den Verlege-Abstand sowie den Wärmeübergangswiderstand vom Fluid auf das Rohr und vom Rohr auf das umgebene Material.

R_i : Berücksichtigt den thermischen Widerstand zwischen der raumseitigen Oberfläche und der Lage der Rohre (rot gestrichelte Linie).

R_e : Berücksichtigt den thermischen Widerstand zwischen der Lage der Rohre und der Bauteilrückseite.

Abbildung 5.3: Schaltbild der thermischen Wärmewiderstände am Beispiel einer wasserführenden Estrich-Fußbodenheizung; in Anlehnung an DIN EN 1264 und DIN EN ISO 11855

Um die Wärmestromdichte zwischen den bauteilintegrierten Rohren und den Bauteiloberflächen modellieren und berechnen zu können, eignet sich das in der DIN EN 1264 bzw. DIN EN ISO 11855 beschriebene Schaltbild von thermischen Widerständen. In Abbildung 5.3 ist das Modell zu Anschauungszwecken über den Querschnitt eines Fußbodenaufbaus mit wasserführender Estrich-Fußbodenheizung gelegt. Dabei wird ein äquivalenter Widerstand R_{HC} zwischen dem wärmeübertragenden Fluid in den Rohren und einem fiktiven Kern, der thermisch aktivierenden Schicht in der Ebene der Rohrseelen gelegt. Mit diesem äquivalenten Widerstand können die Wärmeübergangswiderstände vom Fluid auf das Rohr und vom Rohr auf den Estrich sowie anteilig durch den Estrich zwischen den Rohren berücksichtigt werden. Mit der Temperatur des Fluids in den Rohren und dem äquivalenten Widerstand kann die Temperatur der fiktiven Schicht in der Lage der Rohre berechnet werden. Die Wärmeübertragung von der fiktiven Schicht an die raumseitige und an die rückseitige Oberfläche kann nun unter Verwendung der linearen Widerstände R_i und R_e berechnet werden. R_i und R_e sind zuvor aus der Summe der einzelnen Materialschichten und deren thermischen Widerständen ermittelt worden¹⁵. Es ist festzustellen, dass dieses Modell ausschließlich für stationäre Berechnungen dienen kann, da keine Wärmekapazitäten im Modell enthalten sind und somit keine Erwärmungs- und Abkühlungsvorgänge berücksichtigt werden.

Die Norm sieht eine iterative Berechnung der sich ergebenden Wärmestromdichte vor. Die meisten Hersteller von Flächenheiz- und Kühlsystemen bieten kostenlose Projektierungstools oder stellen ihre Produkt-Datensätze in etablierten haustechnischen Berechnungsprogrammen zur Verfügung. Auch für die Projektierung von flächenintegrierten Kühlsystemen besteht die Möglichkeit, mit den oben genannten Parametern eine Auslegung vorzunehmen. Die systemspezifische Auslegung des Kühlsystems vollzieht sich ebenfalls in Anlehnung an die DIN EN 1264 Teil 2 zur Berechnung der Heiz- und Kühlleistung.

Eine weitere in der Norm beschriebene Methode zur Bemessung eines flächenintegrierten Heiz- und Kühlsystems ist die Auslegung mittels Basiskennlinien-Diagramm. Diese Methode wird in der DIN EN ISO 11855-2: 2016-11 primär zur Ermittlung von Grenzwerten der Wärmestromdichte empfohlen. Wie bereits in Abschnitt 2.6.2 diskutiert, führen zu warme oder kalte Oberflächen zu unbehaglichen Verhältnissen im Raum. Daher wurden bereits in der DIN EN 1264 Grenzkurven der Wärmestromdichte definiert, um thermisch unbehagliche Zustände zu verhindern. In Abbildung 5.4 ist die sogenannte 9 Kelvin-Grenzkurve zur Begrenzung der Wärmestromdichte im Aufenthaltsbereich von Fußbodenheizungen aufgetragen. Diese limitiert die Wärmestromdichte auf ca. 90 bis 100 W/m². Das entspricht einer Temperaturerhöhung der Oberfläche um ca. 9 K gegenüber der Raumtemperatur.

¹⁵ Wenn dieses stationäre Widerstands-Modell für die Beschreibung von thermisch aktivierten Massivholzelementen verwendet werden soll, bei denen die Rohre in das Brettsperrholzelement eingelassen sind, muss die Anisotropie des Holzes beachtet werden. Konkret heißt das, dass bei der Quantifizierung der einzelnen Widerstände die faserrichtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden muss. Dies kann, wie in Abschnitt 2.4.3 erläutert, in Faserrichtung in etwa doppelt so hoch sein wie quer zur Faser.

Da ältere Gebäude mit größerer Heizlast durch diese Limitierung nicht ausreichend beheizt werden konnten, wurde eine zweite Grenzkurve, die sogenannte 15 K-Grenzkurve definiert. Diese lässt eine Temperaturerhöhung von bis zu 15 K in solchen Randbereichen des Raumes zu, wo sich regelmäßig keine Personen aufhalten.

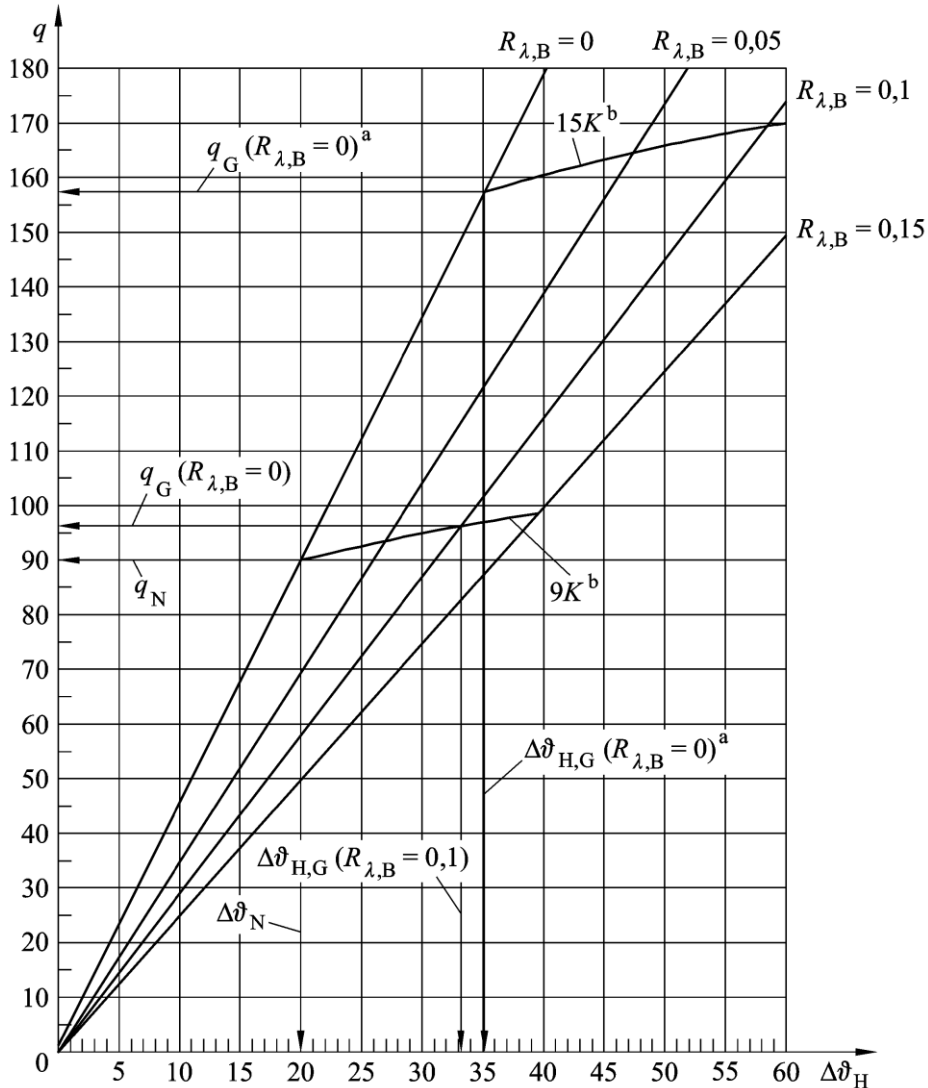


Abbildung 5.4: ‚Prinzip des Verfahrens zur Bestimmung der Grenzwerte der spezifischen Wärmeleistung‘; Bild A5 aus DIN EN 1264-2:2013-03 / Bild A4 aus DIN EN ISO 11855-2:2016-11

Das Diagramm stellt die Wärmestromdichte q an der Oberfläche eines flächenintegrierten Heiz- oder Kühlsystems in Abhängigkeit der Übertemperatur des Heiz- oder Kühlmittels $\Delta\vartheta_H$ dar. Die unterschiedlichen Geraden berücksichtigen einen zusätzlichen thermischen Widerstand durch einen Bodenbelag $R_{\lambda,B}$ in $[m^2 K/W]$. Je größer die thermische Dämmwirkung, durch z. B. einen Teppich, desto flacher die Gerade.

Für die Auslegung der thermisch aktivierten Massivholzelemente werden Auslegungsdiagramme, ähnlich der oben gezeigten Abbildung, für eine Schnellauslegung erarbeitet.

5.1.3 Instationäre Ansätze

Die instationäre Auslegung betrifft als erstes die Projektierung von Kühlsystemen. Die Auslegungsfälle sind deutlich komplexer in der Berechnung und lassen sich durch stationäre Ansätze nicht hinlänglich abbilden. Überdimensionierungen der Kälte- und Klimaanlage sind die Folge, da aufgrund des hochgradig instationären Raumklimaverhaltens im Sommer diverse Sicherheitszuschläge den Ergebnissen der stationären Berechnung hinzugefügt werden müssen, was wiederum die Energie- und Ressourceneffizienz und somit die Wirtschaftlichkeit der Anlagen beeinträchtigt. Im Juni 2015 ist daher die neue VDI Kühllastnorm 2078 im Weißdruck erschienen. Sie gehört zu den allgemein anerkannten Regeln der Technik und beschreibt Verfahren der instationären Berechnung der Raum- und Gebäudekühllast mittels dynamischer Simulation. In der folgenden Abbildung sind links die Berechnungselemente der Kühllast und rechts die allgemeine Vorgehensweise bei der Auslegung von Kühlsystemen beschrieben.

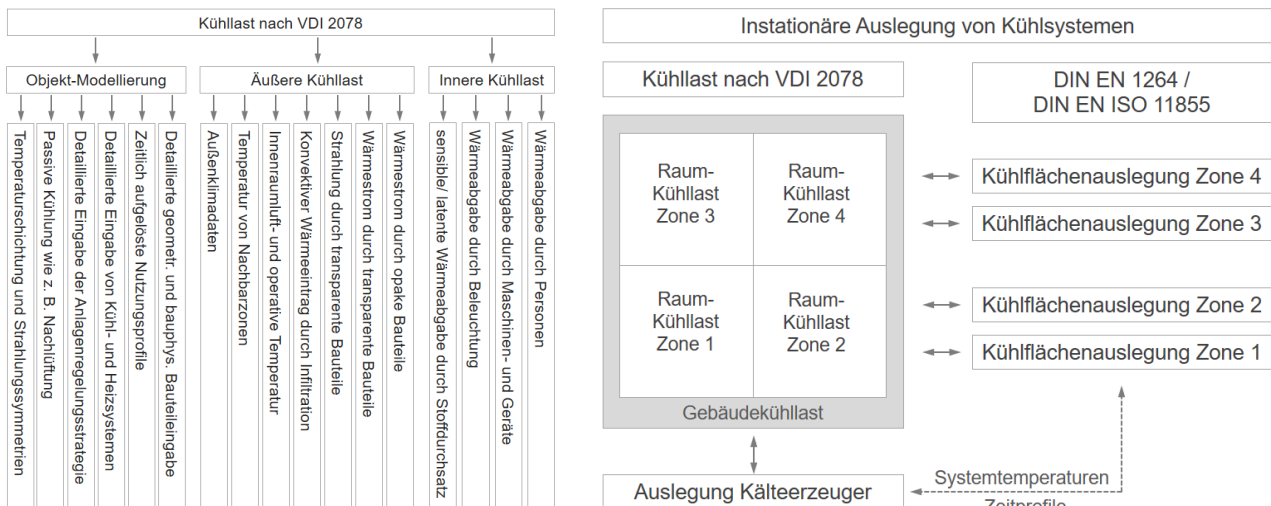


Abbildung 5.5: Systematik der instationären Auslegung von Kühlflächen

In Abbildung 5.5 ist die systematische Vorgehensweise bei der Auslegung von Kühlflächen und sonstigen Kälteanlagen dargestellt. In der linken Hälfte sind die wichtigsten Bestandteile der Kühllastberechnung nach VDI 2078 abgebildet. Die rechte Hälfte soll das Vorgehen bei der instationären Auslegung von Kühlflächen darstellen. Die Wechselfeildbeziehungen zwischen Kühllast- und Kühlleistungsberechnung sollen die gegenseitige Beeinflussung der beiden Verfahren unterstreichen. Während bei der stationären Berechnung eine sequenzielle Abhandlung möglich ist, wird bei der instationären Berechnung bereits für die Ermittlung der Raumkühllast die Anlagentechnik modelliert und ausgelegt. Weder die Kühllast noch die Leistung der Anlagentechnik stehen zu Beginn der Auslegung fest. Da es sich bei der Berechnung um ein ‚Henne-oder-Ei-Problem‘ handelt, erfolgt die Berechnung der Kühlleistung iterativ, mittels numerischer Simulation. Das Verfahren ermöglicht die Berücksichtigung von freier Fensterlüftung ebenso wie die energiesparende Nutzung von Umweltwärme zur Heizung oder Kühlung eines Gebäudes. Energieoptimierte Regelungsstrategien und Betriebsweisen lassen sich ebenso berechnen, wie ein zugeständenes Maß an Nutzerenergieeffizienz.

Somit können Überdimensionierungen der Anlagentechnik aufgrund ungenauer Auslegungsverfahren reduziert werden. Darüber hinaus ermöglicht das Verfahren neben der Ausgabe der Heiz- und Kühlleistung auch die Berechnung der operativen Raumtemperaturverläufe. Die Berechnung kann damit direkt für die Nachweisführung des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN EN 4108 Teil 2 verwendet werden. Im folgenden Abschnitt soll das der installationären Auslegung von thermisch aktivierten Massivholzelementen zugrundeliegende numerische Modell erläutert werden.

5.2 Numerische Modellierung eines thermisch aktivierten Massivholzelements

5.2.1 Allgemein

Ein essenzielles Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Konstruktion eines numerischen Modells zur prädiktiven Bemessung thermisch aktivierter Massivholzelemente in konkreten Einsatzszenarien. Das Modell soll auf Modulen einer validierten und in der Praxis anerkannten Simulationssoftware basieren. Primär bietet das Modell die Möglichkeit, simulationsgestützte Parameterstudien zur weiteren Optimierung des Systems durchzuführen. Final kann das thermodynamische Modell, wie zuvor beschrieben, dazu dienen, das Heiz- und Kühlsystem für konkrete Einsatzszenarien auszulegen.

Allgemein kann unter dem Verfahren der Simulation ein Experiment an einem virtuellen oder physikalischen Modell verstanden werden. Das numerische Modell steht für ein vereinfachtes Abbild einer partiellen Realität. Die Simulation kann dazu hilfreich sein, ein bekanntes Szenario zu verstehen und ggf. zu optimieren oder ein unbekanntes Szenario vorherzusagen (Bungartz). Um Gebäude hinsichtlich ihres Energiebedarfs, ihres Komforts und ihrer Baukosten zu optimieren, setzt sich die Simulation von technischen Vorgängen seit der Einführung der computergestützten Planung als Ergänzung und teilweise als Ersatz von klassischen Rechen- und Abschätzverfahren durch Gebäudesimulationsprogramme erlauben es, die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen Gebäudeeigenschaften, inneren und äußeren Einflüssen wie Außentemperatur, Wind, Verschattung, Nutzerverhalten, Lüftung, innerer Wärmequellen mathematisch, realitätsnah zu beschreiben und Resultate vorherzusagen. Sowohl beim Entwurf von Neubauten als auch für die Analyse und Optimierung von Bestandsbauten lassen sich durch simulationsgestützte Auslegungen von technischen Systemen energetisch und auch ökonomisch optimierte Lösungen finden. Allerdings muss sich der Bediener einer Simulationssoftware jederzeit bewusst sein, dass die Qualität der Ergebnisse einer numerischen Simulation nur so gut ist wie die Eingaben und wie die eingesetzten Modelle. Eine mathematisch explizite Fehlerfortpflanzungsrechnung wie in der kohärenten analytischen Berechnung von technischen Systemen ist in der Regel nicht möglich oder üblich. Die gegenseitige Beeinflussung und die Fortpflanzung von Eingabe- und Modellungsgenauigkeiten lassen sich bei komplexen numerischen Simulationen in der Regel nur abschätzen. In der bauplanerischen Praxis ist es daher üblich, solche Simulationswerkzeuge zu verwenden, die bereits vom Softwarehersteller einer Validierung für den einzelnen konkreten Simulationszweck unterzogen wurden. Bei diesen Programmen ist die Freiheit der Modellierung in der Regel auf das notwendige Minimum reduziert und die Variation der Eingabeparameter an Normwerte geknüpft.

Einige technische Normen bieten Validierungsbeispiele an mit Angabe der Eingabeparameter, um die Validität des verwendeten Programms für den Einsatzzweck selbst zu überprüfen. So kann die planerische Haftung für die Richtigkeit der Ergebnisse zu einem Teil auf den Softwarehersteller übertragen werden. Für wissenschaftliche Zwecke sind die in den Planungs-Normen angegebenen Validierungsbeispiele nur bedingt validitätsstiftend, da sie in der Regel nur für sehr eingegrenzte Szenarien gelten. Schon die Vorgabe, welche Klimadaten als Randbedingung der Simulation zu verwenden sind, schränkt die Einschlägigkeit der Validierung stark ein, sodass der gewünschte Umfang der Untersuchung nicht dem Geltungsbereich der Validierungsbeispiele entsprechen kann.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, die Validierung des empfohlenen numerischen Modells der thermisch aktivierten Massivholzelemente anhand von Messdaten aus den Laborversuchen. Im folgenden Abschnitt werden die zu modellierenden Vorgänge und das dafür eingesetzte Simulationsmodell beschrieben.

5.2.2 Thermodynamische Vorgänge am thermisch aktivierten Massivholzelement

Die folgenden Elemente sollen in dem Simulationsmodell abbildbar sein, um eine hinreichend genaue numerische Beschreibung des thermisch aktivierten Massivholzelements zu gewährleisten:

- der Fluidkreislauf durch das Kanalsystem (asymptotisch abklingender Temperaturverlauf über der Strömungsweglänge),
- der Wärmeübergang vom Fluid auf das Holzelement unter Berücksichtigung des Kanalströmungsprofils,
- die zweidimensionale Wärmeausbreitung und Zwischenspeicherung im Holz sowie
- die Wärmeübertragung zwischen der Elementoberfläche und dem Raum mittels Strahlung und Konvektion

Zur besseren Vorstellung der einzelnen thermodynamischen Prozesse sind diese in Abbildung 5.6 an dem Prototyp B des thermisch aktivierten Massivholzelements aufgetragen.

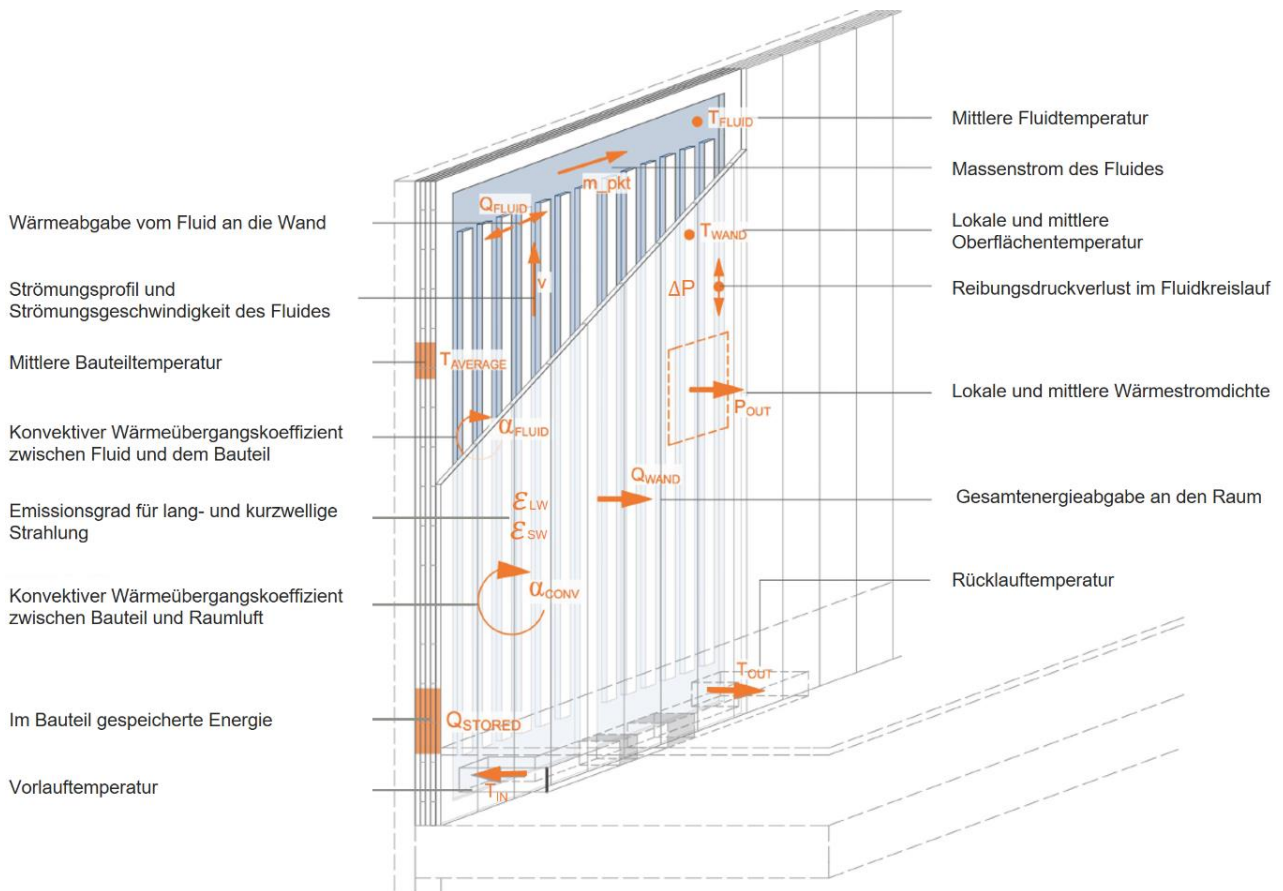


Abbildung 5.6: Thermodynamische Vorgänge des thermisch aktivierten Massivholzelements; in Anlehnung an (Baumgartner 2018)

In den folgenden Abschnitten wird zunächst die Simulationsumgebung vorgestellt, in die das Modell des thermischen aktivierten Massivholzelements implementiert werden soll. Daran anschließend werden die einzelnen Modellkomponenten detailliert erläutert.

5.2.3 Die Simulationsumgebung

In den folgenden Erläuterungen wird, nur soweit es für die Nachvollziehbarkeit der physikalischen Modellierung nötig ist, auf die Eigenheiten der gewählten Simulationssoftware eingegangen. Für das Verständnis der programmspezifischen Eingabe wird entsprechendes Grundwissen vorausgesetzt, bzw. auf die Dokumentation der Software verwiesen.

Die modular aufgebaute Simulationssoftware TRNSYS (transient system simulation tool) bietet unterschiedliche Möglichkeiten zur Implementierung eines Flächenheiz- und Kühlsystems in ein Mehrzonen-Gebäudemodell (Transsolar Energietechnik GmbH 2019). Sie ist in der Berechnung vollständig nachvollziehbar, frei erweiterbar und wurde daher als primäre Simulationsumgebung für diese Arbeit gewählt.

Einige Module für die Implementierung eines flächenintegrierten Heiz- und Kühlsystems sind bereits in dem Kernmodul der thermischen Gebäudesimulation, dem sogenannten Building-Type¹⁶, hinterlegt. Der Building-Type erfasst die raumumschließenden Bauteile in einem Finiten-Schichten-Modell, in dem die Stärken und thermischen Eigenschaften aller Materialschichten berücksichtigt werden. Dieses Modell kann die Temperaturen und Wärmeflüsse orthogonal zu den Bauteiloberflächen zeitabhängig berechnen. Mehrere raumumschließende Bauteile werden auf übergeordneter Ebene zu einem Netzwerk zusammengeschaltet – das sogenannte Raummodell bzw. die thermische Zone. Mehrere Räume ergeben durch Verknüpfung der angrenzenden Bauteile sowie durch die Verkettung der durchströmenden Luftvolumina ein multizonales Gebäude.

Der sogenannte Building-Type bietet im einfachsten Fall die Möglichkeit, das Modell einer Wandheizung durch Berücksichtigung der thermischen Leistung in einer Wandschicht abzubilden. Dabei wird die flächenspezifisch abgegebene thermische Leistung als Wärmegewinn in der raumseitigen Energiebilanz des Wandmodells angerechnet. Durch die Erhöhung des Energieniveaus in der Wandschicht steigt die Temperatur und mit der Temperatur die Wärmeabgabe an die Umgebung bzw. an die rückseitig angrenzenden Materialschichten. Entlang der Ebene werden sämtliche Eigenschaften und Zustände homogen als Mittelwerte beschrieben. Die Wärmeströme werden somit ausschließlich normal zu den Schichten, also rein eindimensional abgebildet. Eine zweidimensionale Modellierung der Wärmeflüsse, wie sie bei Wärmebrücken oder bei den im Bauteil verlegten Heiz- und Kühlleitungen auftreten, ist in diesem Modell nicht direkt möglich.

Schlussfolgerung: Diese vereinfachte Methode wird der Darstellung eines thermisch aktivierten Bauteils nicht gerecht. Weder die konkrete Position des Heizmediums im Bauteil noch dessen Temperaturniveau und dessen thermodynamische Fluideigenschaften können abgebildet werden. Diese Methode wird für den Zweck dieses Projektes nicht weiter betrachtet.

Eine weitere Möglichkeit bietet das, ebenfalls in den Building-Type integrierte, aber deutlich komplexere, sog. „active Layer“-Modell. Dieses Modul wurde eigens für die Simulation von thermisch aktivierten Bauteilen sowie Flächenheiz- und Kühlsystemen entwickelt. Es enthält ein Modell, um die Energiemenge der Fluide je Rohrsegment zu berechnen. Hierdurch können, wie in Abbildung 5.7 gezeigt, der Temperaturverlauf über der Rohrlänge sowie die exakte zweidimensionale Position des Rohres im Bauteilquerschnitt berücksichtigt werden.

¹⁶ Der Begriff Type bezeichnet in der Terminologie des modular aufgebauten Simulationsprogramms eine funktionale Einheit zur Beschreibung eines einzelnen oder eines Wirkzusammenhangs mehrerer physikalischer Probleme. Jeder Type besitzt zeitabhängige „Inputs“ und „Outputs“ die mit anderen Types verknüpft werden sowie nicht zeitabhängige Parameter zur projektspezifischen Modifikation der im Type implementierten Formeln. Die Types können bei der praxisüblichen Modellierung jeweils als „Blackbox“ angesehen werden, um den Bediener der Software von Details zu entlasten. Bei speziellen physikalischen Problemen, welche sich mit den zugrundeliegenden mathematischen Gerüsten nicht beschreiben lassen, kann die Blackbox geöffnet werden, um entsprechende Anpassungen an der Art der Berechnung vorzunehmen.

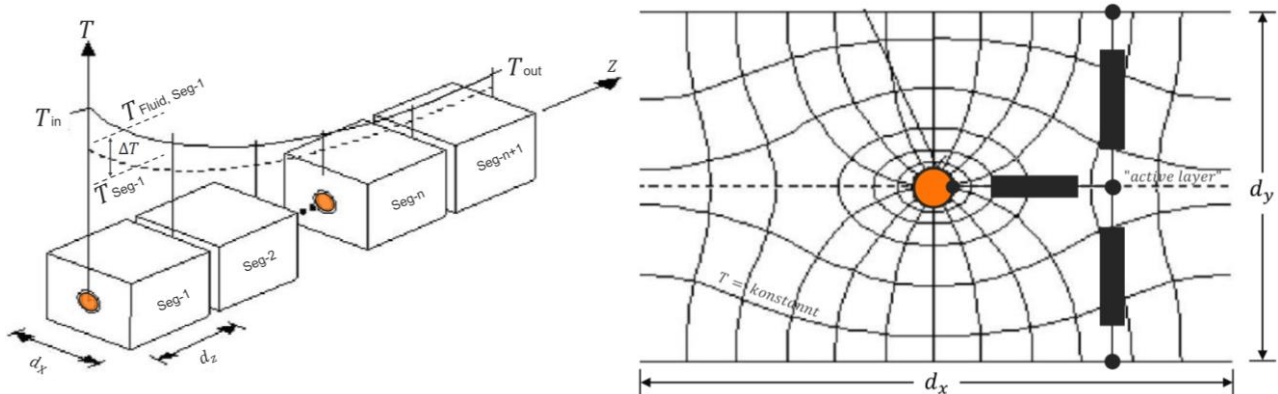


Abbildung 5.7: links: Modell des Temperaturverlaufs einer Rohrleitung innerhalb eines Bauteils; rechts: Temperaturfeld um ein Rohrelement innerhalb eines thermisch aktivierten Bauteils in Anlehnung an: (Transsolar Energietechnik GmbH 2019)

Die räumliche Dimension in Längsrichtung der Rohrachse wird, wie links in Abbildung 5.7 gezeigt, durch die vorgeschaltete Berechnung der äquivalenten Fluidtemperatur je Segment reduziert. Wie in Wärmetauschern üblich, beschreibt die Temperatur des Fluids entlang der Rohrachse einen sich asymptotisch an die Umgebungstemperatur annähernden Verlauf. Im Eintritt in das Rohr besteht die größte Temperaturdifferenz zwischen dem Fluid und der Umgebung. Entsprechend groß ist hier der Wärmestrom aus dem ersten Rohrsegment und somit auch die Temperaturdifferenz. Dieser Verlauf wird berücksichtigt, indem je nach zulässiger Ungenauigkeit, das Rohr in einzelne Segmente der Länge d_z zerlegt wird. Für die diskrete Länge dieser Segmente werden dann eine mittlere Fluidtemperatur und ein Wärmestrom durch die Rohrwandung berechnet. So kann das thermisch aktivierte Bauteil faktisch dreidimensional modelliert werden. Mit diesem Modell ist es möglich, bei unterschiedlichen Fluiden den Energiegehalt, den strömungsabhängigen Wärmeübergang auf das Rohr und auf das Bauteil sowie die hydraulische Verschaltung des Rohrsystems im Bauteil detailliert abzubilden. Mit der äquivalenten Fluidtemperatur kann der mittlere Wärmeübergang vom Fluid auf den Rohrmantel berechnet werden. Nach der darauffolgenden Berechnung des Wärmeübergangs vom Rohr in das Bauteil wird die Wärmeausbreitung im Bauteil, um das Rohr herum, zweidimensional modelliert. Da das Bauteilmodell in TRNSYS bei der Verknüpfung mehrerer Bauteile zu einem Raummodell, wie oben beschrieben, nur eindimensionale Wärmeströme bilanzieren kann, muss im Weiteren das zweidimensionale Wärmeflussfeld um den Rohrmantel auf ein eindimensionales Problem reduziert werden. Dies geschieht mit Hilfe von Geometriefaktoren, welche die räumliche Überdeckung des Rohres zu dem Abstand der Rohre zueinander ins Verhältnis setzen. Durch die Geometriefaktoren kann der Wärmefluss, welcher seitlich aus den Rohren fließt, respektive parallel zur Bauteiloberfläche, mit dem Wärmefluss senkrecht zur Bauteiloberfläche verrechnet werden. Die Berechnung ähnelt der stationären Berechnung in Abschnitt 5.1.2, allerdings werden zusätzlich instationäre Effekte der thermischen Speicherfähigkeit berücksichtigt. An der Schichtoberfläche kann nun, wie im sogenannten Building-Type üblich, mit einem eindimensionalen Wärmestrom je Bauteiloberfläche weitergerechnet werden. Damit diese Reduzierung auf einen eindimensionalen Wärmefluss zulässig ist, müssen einige Bedingungen an die Geometrie des zweidimensionalen Wärmeflussfeldes erfüllt sein.

Ist die Überdeckung der Rohrleitungen zu gering oder der Abstand der Rohrleitungen zueinander zu groß, funktioniert diese Verrechnung der Wärmeflüsse nicht im Rahmen der geforderten Genauigkeit. Ferner bestehen Anforderungen an den thermischen Widerstand der Bauteilrückseite, da auch dann die Verrechnung der zweidimensionalen Wärmeströme nicht hinreichend genau funktioniert, wenn der rückseitige Wärmestrom zu groß wird. Weitere Limitierungen des sog. ‚active Layer‘-Modells liegen in der Modellierbarkeit von Luft als Wärmeüberträgermedium. Luft besitzt eine deutlich geringere Dichte sowie volumenbezogene Wärmespeicherfähigkeit und unterscheidet sich deutlich in seinen fluiddynamischen Eigenschaften im Vergleich zu Wasser. Aufgrund dieser und weiterer Einschränkungen und der Nichterfüllbarkeit der oben genannten Bedingungen kann das ‚active layer‘-Modell nicht zur Modellierung der thermisch aktivierten Massivholzelemente verwendet werden.

Einführung des TYPE 360 Floor Heating and Hypocaust

Durch den modularen Aufbau der Simulationssoftware TRNSYS, kann zur Simulation unterschiedlichster physikalischer Probleme auf eine Vielzahl von weiteren bestehenden Lösungen in Form von Simulations-Types zurückgegriffen werden. Ein solcher Type, der für die Simulation von luftgeführten Bauteilaktivierungen entwickelt wurde, ist der TRNSYS-Type: ‚TYPE 360: Floor Heating and Hypocaust‘ von Karel Fort. (Fort) Dieser Simulationstyp ist als Open-Source-Modul vollständig nachvollziehbar und kann im Rahmen der Lizenzrechte frei erweitert werden. Die im Weiteren beschriebene Modellierung basiert auf diesem Modul.

Aufbau der Simulationsumgebung um TYPE 360

In diesem Abschnitt soll das Modell beschrieben werden, mit dem thermisch aktivierte Massivholzelemente instationär berechnet werden können. Im anschließenden Abschnitt 5.3 wird der Abgleich der Simulationsdaten mit den im Labor gemessenen Daten beschrieben, durch die das Modell validiert werden soll.

Wesentliche Bestandteile des Gesamtmodells sind:

- das Mehrzonen-Gebäudemodell (TYPE 56),
- ein allgemeiner Umrechnungs- und Eingabe-Type für zeitabhängige Variablen (EQUA),
- der TYPE 360 incl. dessen Eingabemaske für zeitunabhängige Systemparameter,
- eine Geometrie- und Materialdatendatei, welche das zweidimensionale Knotenmodell des Massivholzelements enthält (.fbh-Datei) sowie
- ein Ausgabemodul, mit dem die Simulationsergebnisse dargestellt werden.

In der Abbildung 5.8 sind die genannten Hauptkomponenten des Modells um den TYPE 360 dargestellt (Fort 2001).

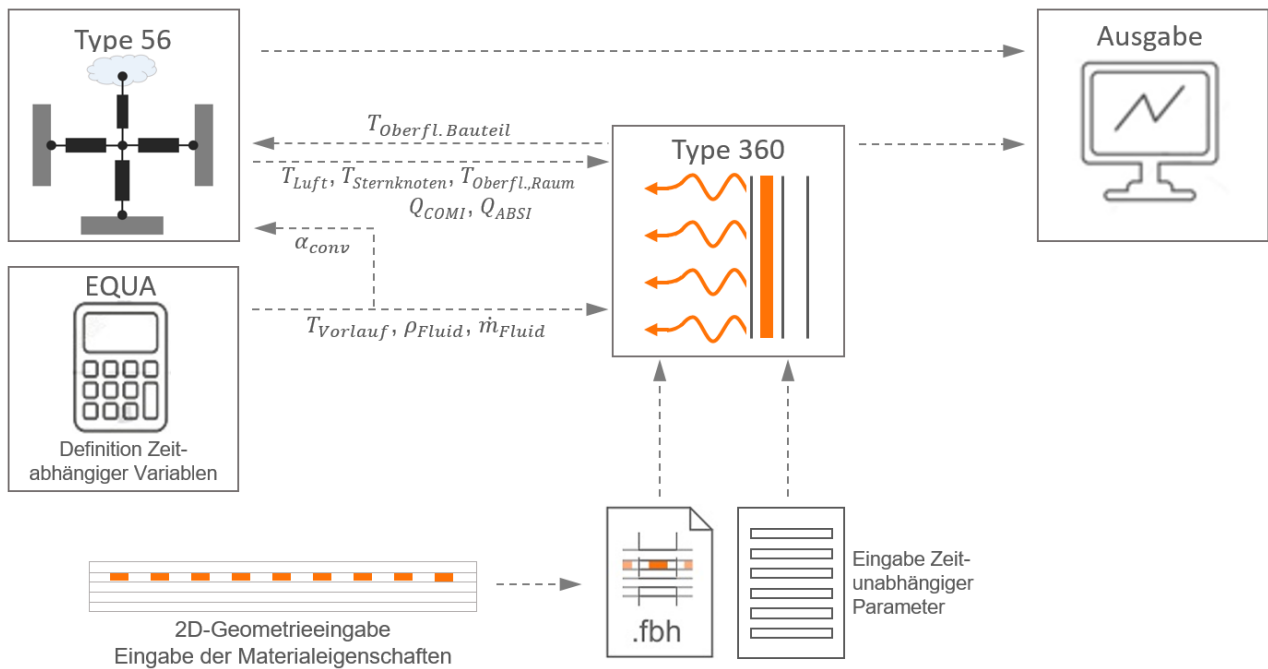


Abbildung 5.8: Einbindung des TYPE 360 in die TRNSYS-Simulationsumgebung

Die numerische Beschreibung des thermisch aktivierten Massivholzelements erfolgt zum einen über eine externe Datei (fbh-Datei), in der die Geometrie des Bauteils und dessen bauphysikalische Eigenschaften definiert sind und zum anderen direkt über die Eingabemaske des Types 360.

Um den Rechenaufwand bei der Simulation gering zu halten, wird unter Anwendung von Symmetriebedingungen nur ein Teil des tatsächlichen Bauteils numerisch beschrieben. In der Abbildung 5.9 ist links das gesamte Bauteil abgebildet. Der hellrot gestrichelte Rahmen zeigt den repräsentativen Ausschnitt des Elements, welcher, wie im rechten Teil der Abbildung gezeigt, detailliert modelliert wird.

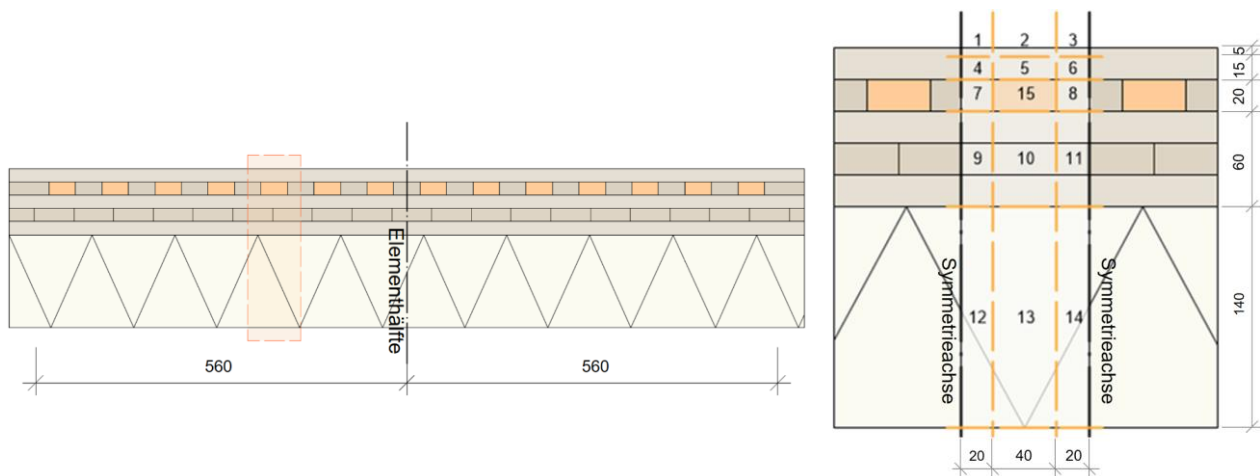


Abbildung 5.9: Geometrische Definition des Finite-Differenzen-Gitters; Abbildung in Anlehnung an (Vitopoulou 2018)

Im rechten Teil der Abbildung ist das Finite-Differenzen-Gitter mit der Nummerierung der Rechenknoten illustriert. Die höchste Nummer ist stets der luft- oder wasserführende thermisch aktivierende Knoten. Die Wahl der Anzahl der Knoten richtet sich nach der geforderten lokalen Genauigkeit. In dem oben gezeigten Beispiel liegt der Fokus auf den raumseitigen Schichten des Elements. Hier sind die Knotenweiten deutlich geringer als im rückseitigen, gedämmten Teil. Insbesondere nahe der Oberfläche sollte eine geringere Maschenweite gewählt werden, um zeitliche Änderungen des Temperatur- und Energieverlaufes hinreichend genau auflösen zu können. Im Rahmen der Symmetriebedingungen wird angenommen, dass sich je wiederkehrendem Luftkanalumfeld ein ähnliches thermisches Feld ausbildet. Daher wird lediglich ein Kanal in der Eingabe definiert. Die rechte Elementhälfte ist geometrisch und in ihren Materialeigenschaften ähnlich. Daher kann auch hier eine Symmetrie angenommen werden und der gleiche Aufbau wie auf der linken Hälfte angesetzt werden. Eine Besonderheit der thermisch aktivierten Massivholzelemente ist allerdings der doppelharfenförmige Strömungsverlauf im Inneren der produzierten Prototypen. Die Luft strömt auf der linken Elementhälfte nach oben, kühlt dabei etwas ab und strömt dann auf der rechten Elementhälfte wieder nach unten. Folglich ist die mittlere Temperaturdifferenz und damit die Leistung auf der linken Elementhälfte höher als rechts. Dieses Problem wird durch eine angepasste Geometrie des Gesamtelements berücksichtigt. Mehr dazu im nachfolgend beschriebenen Überpunkt: ‚Fluidkreislauf und Wärmeübergang auf das Holzelement.‘ Durch die Verknüpfungen zwischen den Modulen Type 360 (Bauteil) und Type 56 (Raum / Gebäude) wird, bautechnisch gesprochen, das thermisch aktivierte Massivholzelement in das Raummodell eingebaut. Abbildung 5.10 soll die Schnittstelle zwischen dem Bauteil- und dem Raummodell in Form der grau gestrichelten Linie veranschaulichen. Dargestellt ist ein Raum im Grundriss und ein Wandstück, in dem das thermisch aktivierte Bauteil implementiert wird. Die maßgebenden physikalischen Größen in der Verknüpfung zwischen den beiden Oberflächen des Bauteilmodells und den Raummodellen sind jeweils die mittlere Temperatur und die mittlere Wärmestromdichte.

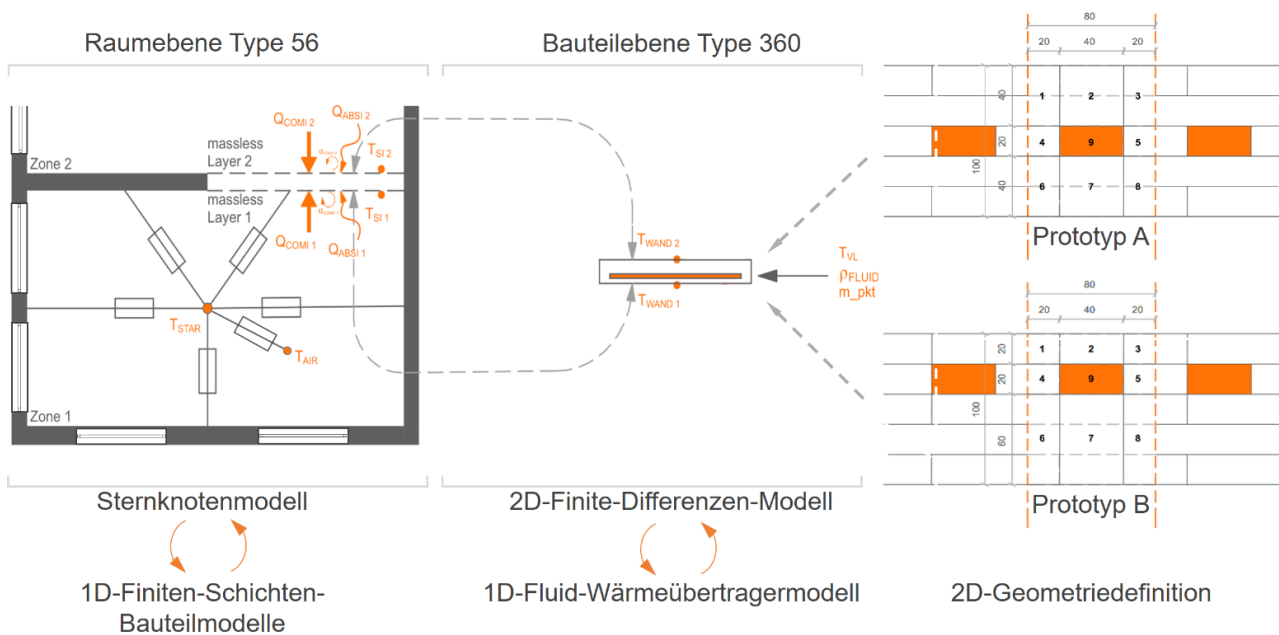


Abbildung 5.10: Grundrisschema - Verknüpfung des Bauteilmodells mit dem Raummodell

Die eigentliche thermische Gebäudesimulation auf Raumebene wird von dem Type 56 ausgeführt. Dort werden alle Bauteilmodelle der raumumschließenden Oberflächen in Form eines Widerstandsnetzwerkmodells zu einem Raummodell verknüpft. Das Modell ist in unterschiedlich komplexen Varianten ausführbar. Im Weiteren wird das sogenannte Sternknotenmodell verwendet. Dabei werden alle Raumboflächen über einen imaginären Sternknoten untereinander und mit dem Energiebilanzknoten der Raumluft verknüpft. Diese Bauteilverknüpfungen kombinieren den konvektiven und den radiativen Wärmeaustausch jeder Oberfläche mit dem Raum. Im radiativen Wärmeaustausch sind die langwellige Wärmestrahlung der Umgebung sowie die kurzwellige Solarstrahlung enthalten. Haupteinflussparameter ist die Emissivität der Oberfläche. Der konvektive Wärmeaustausch hängt, wie in Abschnitt 2.4.4 beschrieben, im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und angrenzender Luft, der Neigung der Oberfläche sowie von der lokalen Luftgeschwindigkeit vor der Oberfläche ab. Die Wärmestromdichte an der Oberfläche des thermisch aktivierten Elements lässt sich mit Hilfe der konvektiven und radiativen Wärmeübergangskoeffizienten und der Temperaturdifferenz zwischen Raum und Bauteiloberfläche berechnen. Die Temperatur der Bauteiloberfläche hängt wiederum implizit von der Differenz zwischen Wärmezufuhr und Wärmeabfluss ab. Da es sich hierbei um ein ‚Henne-oder-Ei-Problem‘ handelt, muss das Bauteilmodell in den iterativen Lösungsprozess des Raummodells eingebunden werden. Bei der Simulationsrechnung wird in jedem Zeitschritt solange zwischen dem Bauteilmodell und dem Raummodell iteriert, bis eine ausreichend konsistente Lösung des Gleichungssystems vorliegt. Die intermodellare Iterationsschleife soll durch die beiden grau gestrichelten Doppelpfeilbeziehungen verdeutlicht werden. Als Schnittstelle wird im Raummodell eine fiktive masselose Schicht eingegeben, die raumseitig wie alle weiteren Raumflächen, mit dem Wärmeübertragungsnetzwerk des Raummodells über Wärmeübergangskoeffizienten verknüpft ist. Auf der raumabgewandten Seite ist die fiktive Schicht wärmeschlüssig mit dem Bauteilmodell verbunden. Innerhalb des Bauteilmodells werden, wie zuvor beschrieben, die Wärmeübertragungsmechanismen zweidimensional mittels 2D-Finite-Differenzen-Methode berechnet, um dem nicht orthogonal zur Oberfläche verlaufenden Wärmefluss um die Luftkanäle Rechnung zu tragen.

Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten an der raumseitigen Bauteiloberfläche

Die Schnittstelle zwischen dem Bauteilmodell und dem Raummodell ist eine masselose Schicht auf jeder Seite des Bauteilmodells. Innenseitig ist das Bauteilmodell des Types 360 wärmeschlüssig mit den beiden masselosen Schichten verbunden. Außenseitig wird die Wärmeübertragung zum Raum durch einen konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten a_K und durch das Strahlungsmodell des Type 56 berechnet. Der Type 360 bietet eine Routine zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten a_K nach Gleichung (5-1). Dieser ist abhängig von der Differenz zwischen der Temperatur der aktiven Oberfläche und der Temperatur der Raumluft. An dieser Stelle soll ein alternativer Berechnungsvorschlag eines weiteren Autors vorgestellt werden. Dabei handelt es sich um das empirische Berechnungsmodell nach Glück, B., welches bereits in Abschnitt 2.4.6 diskutiert wurde. Die Berechnungsansätze beider Quellen werden in Abbildung 5.11 graphisch und der folgenden Tabelle numerisch dargestellt. Beide Ansätze werden in der Modellvalidierung alternativ verwendet und bewertet. Das passendere beider Modelle soll für die Modellempfehlung verwendet werden.

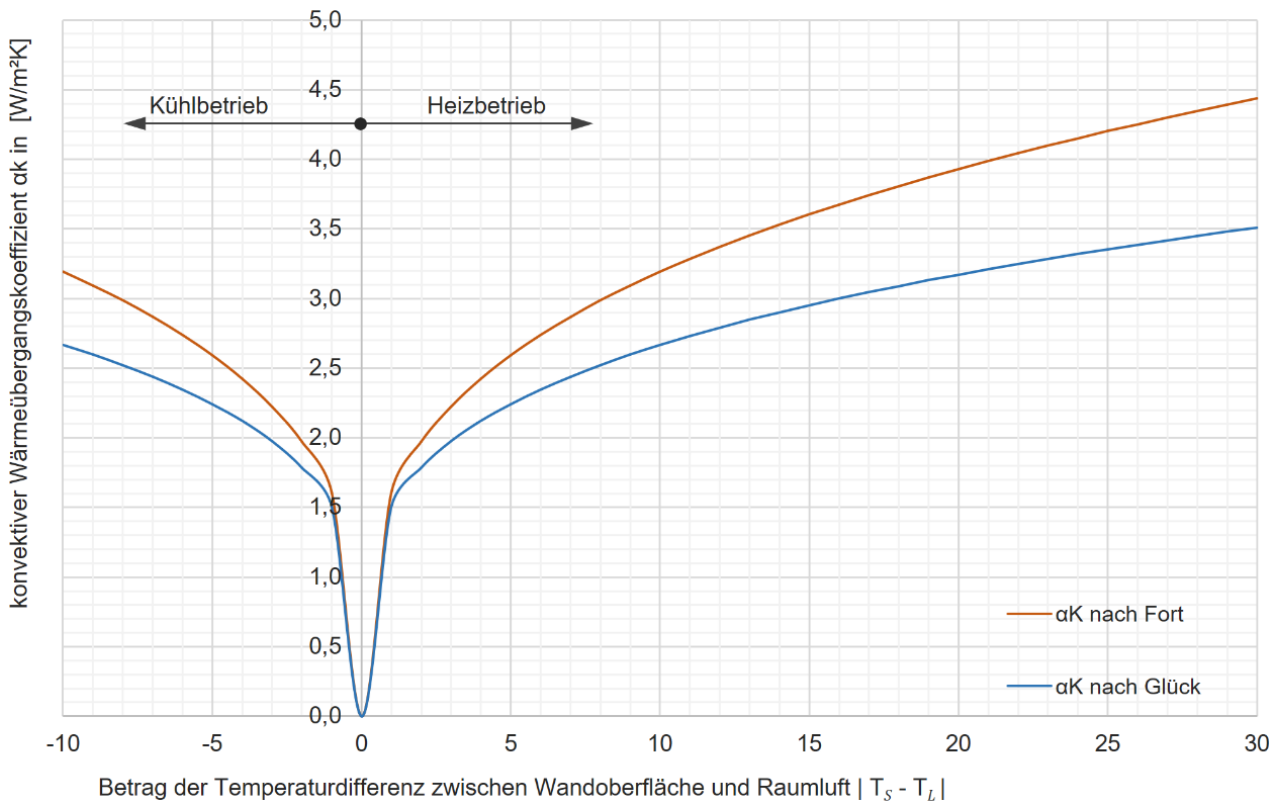


Abbildung 5.11: Vergleich der empirischen Berechnungsmodelle für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für vertikale Heiz- und Kühlflächen nach (Fort 2001) und (Glück 2008)

Abbildung 5.11 trägt die empirisch ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten nach Fort und nach Glück über der Temperaturdifferenz zwischen der aktiven Wandoberfläche und der Raumluft auf. Der von Glück empfohlenen Berechnungsformel liegt ein Ähnlichkeitsmodell mit einer charakteristischen Länge des Strömungsfeldes von $l = 3 \text{ m}$ zu Grunde. Die charakteristische Länge des Strömungsfeldes entspricht, wie in Abschnitt 2.4.4 erläutert, der Höhe der thermisch aktivierten Wandfläche. Die thermisch aktivierten Massivholzelemente liegen mit einer Höhe von ca. 2,5 m nahe dieses Geltungskriteriums. Eine weitere wichtige Randbedingung für die Einschlägigkeit der Berechnungsformel ist die lokale Luftgeschwindigkeit vor der Oberfläche. Diese ist in beiden Berechnungsformeln mit $v = 0 \text{ m/s}$ angenommen. In der Abbildung 5.11 kann diese Annahme an den zu Null werdenden Verläufen an der Position $|T_s - T_L| = 0 \text{ K}$ nachvollzogen werden. Ein konvektiver Wärmeübergangskoeffizient kann nur dann zu Null werden, wenn keine von außen induzierte Luftströmung an der Elementoberfläche anliegt. Bei Temperaturgleichheit kommt der thermische Auftrieb in der Grenzschicht zum Erliegen und es findet keine Konvektion mehr statt, was mit dem entsprechenden Wert des $\alpha_k = 0 \text{ W/m}^2\text{K}$ beschrieben ist. In Anwendungsfällen, in denen die thermisch aktivierten Elemente in Räumen mit mittleren Luftströmungsgeschwindigkeiten deutlich über Null eingesetzt werden, sollten entsprechende Formeln für Mischkonvektion oder sogar für erzwungene Konvektion für die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten angewendet werden.

$$\alpha_{k,T360} = 1,5 \cdot |T_S - T_L|^{0,25} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (5-1)$$

$$\alpha_{k,Glück} = 1,6 \cdot |T_S - T_L|^{0,3} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (5-2)$$

$\alpha_{k,[Quelle]}$	[W/m ² K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient nach Fort, und nach Glück
T_S	[°C]	Temperatur der Oberfläche
T_L	[°C]	Temperatur der Luft

Für die Verwendung des Glück’schen konvektiven Übergangskoeffizienten nach Formel (5-2) wird die folgend beschriebene Umrechnung verwendet.

Zur Umrechnung werden die Gleichungen (5-1) und (5-2) nach $|T_S - T_L|$ umgestellt und einander gleichgesetzt.

$$\sqrt[0,3]{\frac{\alpha_{k,Glück}}{1,6}} = \sqrt[0,25]{\frac{\alpha_{k,T360}}{1,5}} \quad (5-3)$$

Ein Umstellen der Gleichung (5-3) liefert:

$$\alpha_{k,Glück} = 1,6 \cdot \left(\frac{\alpha_{k,T360}}{1,5}\right)^{1,2} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (5-4)$$

Bei der Validierung werden beide Berechnungsansätze in das Modell eingesetzt und geprüft.

Fluidkreislauf und Wärmeübergang auf das Holzelement

Die Luftführung durch die prototypischen Probekörper der thermisch aktivierten Massivholzelemente entspricht einer Serienschaltung der beiden harfenförmig aufgebauten Elementhälften. Das Arrangement wird deshalb als ‚doppelharfenförmige‘ Strömungsführung bezeichnet. Diese Verschaltung bietet, wie in Abschnitt 3.3.4 erläutert, den Vorteil, dass beide Anschlussöffnungen im Sockelbereich des Elements liegen und dass sämtliche Strömungspfade durch das Element gleich lang sind. Die folgende Abbildung zeigt die zur Verfügung stehenden Schaltungs-Modi des Type 360 und die Modellierung des tatsächlichen Arrangements der beiden hergestellten Prototypen.

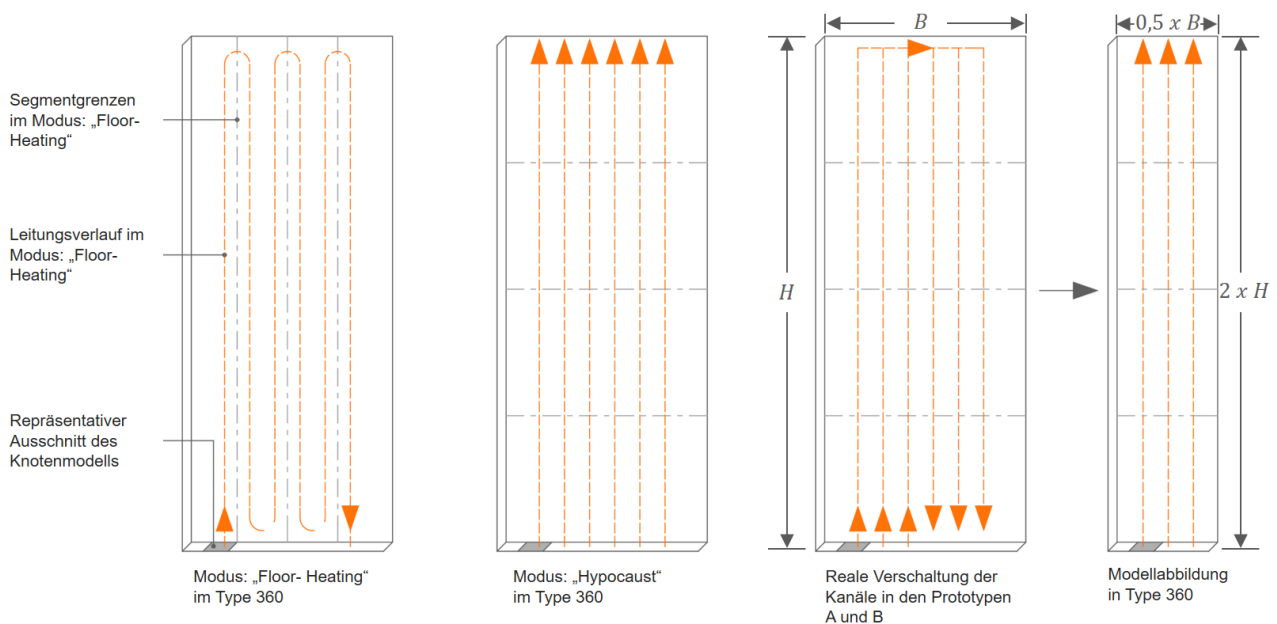


Abbildung 5.12: Mögliche Schaltbilder von Fluidkreisläufen des TYPE 360

In Type 360 können eine seriell mäanderförmige Schaltung (Modus: Floor-Heating) oder eine parallel durchströmte Schaltung (Modus: Hypocaust) modelliert werden. Wasserführende Systeme mit hoher Wärmespeicherfähigkeit des wärmeübertragenden Mediums, wie beispielsweise eine Fußbodenheizung, werden üblicherweise seriell geschaltet und entsprechend mit dem Modus: Floor-Heating modelliert. Dagegen bietet der Modus ‚Hypocaust‘ die Möglichkeit einer parallelen Durchströmung aller Kanäle mit Luft. Die reale Verschaltung der thermisch aktivierten Massivholzelemente entspricht dem in Abbildung 5.12 mittig rechts dargestellten Schema. Diese Schaltung entspricht einer Serie der beiden Elementhälften. Für die Modellierung dieser Schaltung wird gedanklich eine der Elementhälften ‚nach oben geklappt‘. Bildlich ist dieses in der Abbildung ganz rechts dargestellt und wird durch die Halbierung der Elementbreite und Verdopplung der Elementhöhe eingegeben. Mit dieser Veränderung des Elementformates wird die tatsächliche Verschaltung der Luftkanäle annähernd korrekt abgebildet und die Berechnung der Strömungsweglänge und der lokalen Strömungsgeschwindigkeit möglich. Das Strömungsfeld des Wärmeüberträgermediums kann nun in Abhängigkeit seiner fluiddynamischen Eigenschaften abgebildet werden. Wie bei der Berechnung eines Wärmetauschers üblich, wird nun die äquivalente Fluidtemperatur berechnet, aus der dann jener über die Kanallänge gemittelte Wärmefluss in das Material bestimmt werden kann. Um eine höhere Genauigkeit zu erzielen, wird je nach Gesamtlänge des Strömungsweges dieser in mehreren Segmenten getrennt berechnet. Diese Vorgehensweise entspricht der in Abbildung 5.7 dargestellten Methode. Der Wärmeübergang vom Fluid auf das Holz wird aus der Rauigkeit der Holzoberfläche, dem Kanalquerschnitt, der Strömungsgeschwindigkeit sowie den fluiddynamischen Eigenschaften des Wärmeüberträgers berechnet.

5.3 Modellvalidierung

5.3.1 Begriffsdefinition

Für den Begriff Validierung ist unter der Duden-Bedeutungsübersicht die folgende Definition zu finden: ‚die Wichtigkeit, die Gültigkeit, den Wert von etwas feststellen, bestimmen‘. Im Sinne dieser Arbeit wird unter dem Begriff Validierung eine Qualitätssicherung verstanden, mit dem Zweck des Nachweises der Eignung beziehungsweise der Praxistauglichkeit des numerischen Bauteilmodells. Dazu zählt insbesondere dessen Parametrierung und Einbindung in das thermische Gebäudemodell für die prädiktive Berechnung des instationären thermischen Verhaltens im Rahmen einer numerischen Gebäudesimulation. Die Modellvalidierung wird anhand eines Messdatenabgleichs durchgeführt. Die Validität des Modells wird durch die Abweichung zwischen den Messdaten der Laborversuche und Simulationsdaten quantifiziert. Dabei werden die Simulationsdaten unter gleichen Randbedingungen erzeugt wie die realen Labormessdaten. Auf der Modellvalidierung aufbauend werden in Kapitel 6 thermische Simulationen auf Bauteil- und auf Raumebene durchgeführt, aus denen Aussagen zu der erreichbaren thermischen Leistung des Systems gemacht werden.

5.3.2 Messdatenabgleich

Zur Validierung des Bauteilmodells werden die Messwerte des Versuchsaufbaus mit den Daten der Simulation verglichen. Dafür wurde das Gesamtmodell so aufgebaut, dass mögliche Abweichungen auf die Parameter und Variablen des Bauteilmodells eingegrenzt werden können. Der grafischen Oberfläche des TRNSYS-Simulationsstudios in Abbildung 5.13 können die Bestandteile des Validierungsmodells entnommen werden.

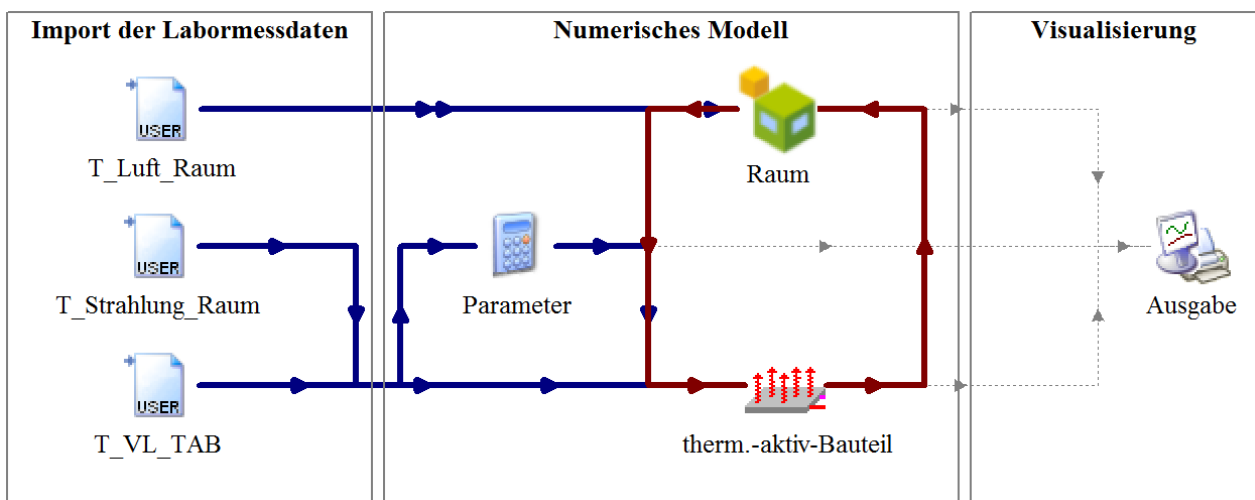


Abbildung 5.13: Aufbau des numerischen Validierungsmodells TRNSYS 17 Simulationsstudio (Transsolar Energietechnik GmbH 2019)

Wesentliches Merkmal dieses Validierungsmodells sind die Datenlese-Module für die Lufttemperatur und die mittlere Strahlungstemperatur des Laborraumes sowie der gemessenen Lufttemperatur an der Einströmöffnung. So ist sichergestellt, dass das numerische Bauteilmodell mit den exakt gleichen klimatischen Randbedingungen betrieben wird wie der reale Versuchsaufbau. Nur so ist ein Vergleich der Bauteilmessdaten mit den Bauteilsimulationsdaten sinnvoll.

Neben der identischen Vorlauftemperatur des Luftmassenstromes im Systemluftkreislauf muss sichergestellt werden, dass die thermische Umgebung des numerischen Modells mit dem Raumklima während der Messungen übereinstimmt. Dafür wurden die Messwerte der gemessenen Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur in das thermische Raummodell der Simulation importiert. Diese Werte wurden als Sollwerte für das Raumheizungs- und Kühlungsmodell definiert. Durch eine jeweils unlimitierte und unverzögerte Heiz- und Kühlleistung konnten in dem numerischen Modell stets im Rahmen der Messunsicherheit ähnliche Klimarandbedingungen hergestellt werden, wie zur Zeit der Versuche im Labor vorgeherrscht haben.

5.3.3 Ergebnisse des Messdatenabgleichs

In diesem Abschnitt soll ein Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Daten diskutiert werden. Für eine bessere Übersichtlichkeit werden hier ausgewählte, repräsentative Mess- und Simulationsdaten gezeigt. Die Messdaten entstammen mitunter aus den in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Szenarien vom 17.05.2018 bis 31.05.2018. In der Gegenüberstellung sollen zum einen die stationären Leistungswerte des Systems abgebildet und quantitativ bewertet und zum anderen das dynamische Verhalten bei Betriebswechseln diskutiert werden. In Abbildung 5.14 wird das aus Abbildung 4.27 bekannte Szenario gezeigt. Neben den bereits diskutierten gemessenen Daten sind die Ergebnisse der numerischen Simulation aufgetragen. Bei dem Szenario wird eine Abfolge von Heiz-, Kühl- und Abschaltzuständen durchlaufen. Besonders interessant sind die Wechsel zwischen Kühl- und Heizbetrieb. Im oberen Teil der Abbildung kann der Betriebszustand anhand der Vorlauftemperatur der Systemluft in der Zeitleiste abgelesen werden. Aus klimatischen Randbedingungen für den Validierungsversuch ist die Lufttemperatur des Laborraumes in hellblau abgebildet. Die Vorlauftemperatur der Systemluft ist braun eingefärbt und folgt der eingestellten Sprungfunktion ohne erkennbare Verzögerung und wie zuvor diskutiert, mit geringer Standardabweichung im Heizbetrieb und mit mäßiger Standardabweichung im Kühlbetrieb. Die Messwerte der Vorlauftemperatur sind wie die gemessenen Raumklimadaten als Randbedingungen in die Simulation eingelesen worden.

Gegenstand des Messdatenabgleichs sind die Simulations- und Messdaten der mittleren Oberflächentemperatur in grau sowie die Simulations- und Messdaten der mittleren Wärmestromdichte in braun.

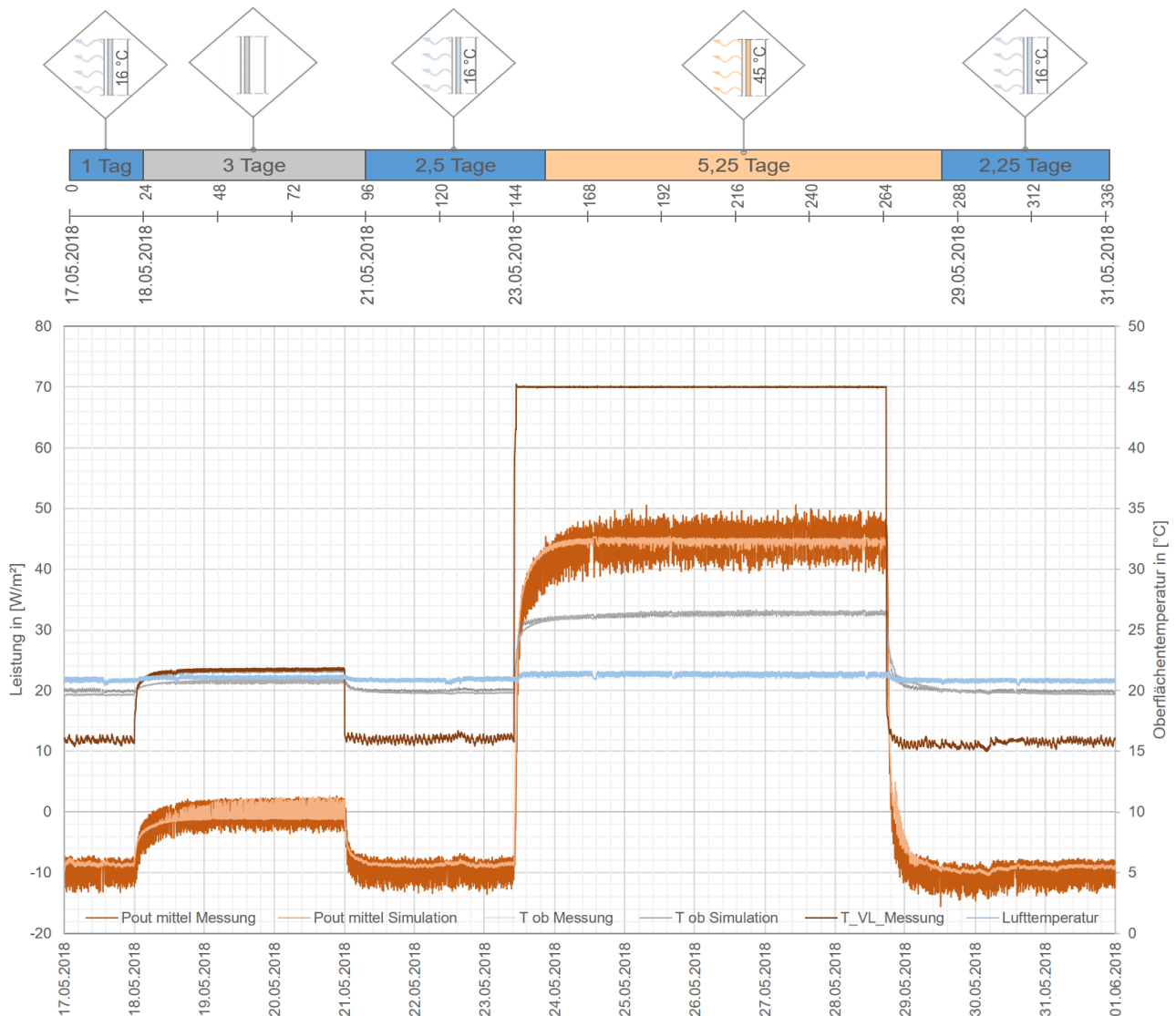


Abbildung 5.14: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Daten

Eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Daten der mittleren Oberflächentemperatur und der mittleren Wärmestromdichte kann zunächst im stationären Zustand für das zeitliche Mittel der Werte festgestellt werden. Auffällig ist die sich stark unterscheidende Schwankungsamplitude. Sowohl bei der Oberflächentemperatur als auch bei der Wärmestromdichte weisen die gemessenen Werte eine sehr viel größere Schwankung um den Mittelwert auf als bei den simulierten Werten. Diese Schwankungen stammen, wie bereits in Abschnitt 4.3.2 ausführlich erläutert, von der Regelhysterese des Raumklimagerätes des Laboratoriums. Diese Schwankungen der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte prägen sich den an der Oberfläche des Massivholzelementes gemessenen Werten auf. Nun stellt sich die Frage, warum dieser Effekt nicht in gleicher Stärke auch in den Simulationsdaten zu erkennen ist. An einen Erklärungsversuch kann sich durch die räumliche und zeitliche Diskretisierung des Simulationsmodells angenähert werden. Die räumliche Diskretisierung kann dem in Abbildung 5.9 gezeigten Knotengitter entnommen werden.

Aufgrund der begrenzten Rechenleistung kann das Finite-Differenzen-Gitter nicht beliebig fein aufgelöst werden. Die finite Schichtstärke der ersten Knotenlage führt dazu, dass ein- und ausfließende Energieströme auf eine entsprechende Materialschicht aufgeteilt werden und somit zu einer geringeren zeitlichen Temperaturänderung führen, als wenn diese auf eine singuläre Schicht konzentriert würden. Im Realmodell sind die Temperatur- und Wärmeflussensoren wärmefähig mit der Oberfläche des Massivholzelements verbunden und können die Effekte messen, die direkt an der Oberfläche stattfinden. Ebenfalls führt die zeitliche Diskretisierung der Simulationszeitschrittweite zu einem mittellenden Effekt der zeitlichen Temperaturänderungen in den Simulationselementen. Eine Überprüfung dieser Vermutungen hat ergeben, dass sowohl eine geringere Maschenweite als auch eine geringere Zeitschrittweite zu einer höheren Übereinstimmung der Schwankungsamplituden zwischen gemessenen und simulierten Daten führt. Da diese Effekte als für die Praxis irrelevant eingeschätzt werden und das zeitlich gemittelte Niveau zwischen gemessenen und simulierten Daten eine sehr hohe Übereinstimmung aufweist, wird die Schwankung der Labormesswerte nicht weiter betrachtet. In der Abbildung 5.15 sind die zeitlich gemittelten Werte aus Messung und Simulation für die Dauer des stationären Zustands aufgetragen.

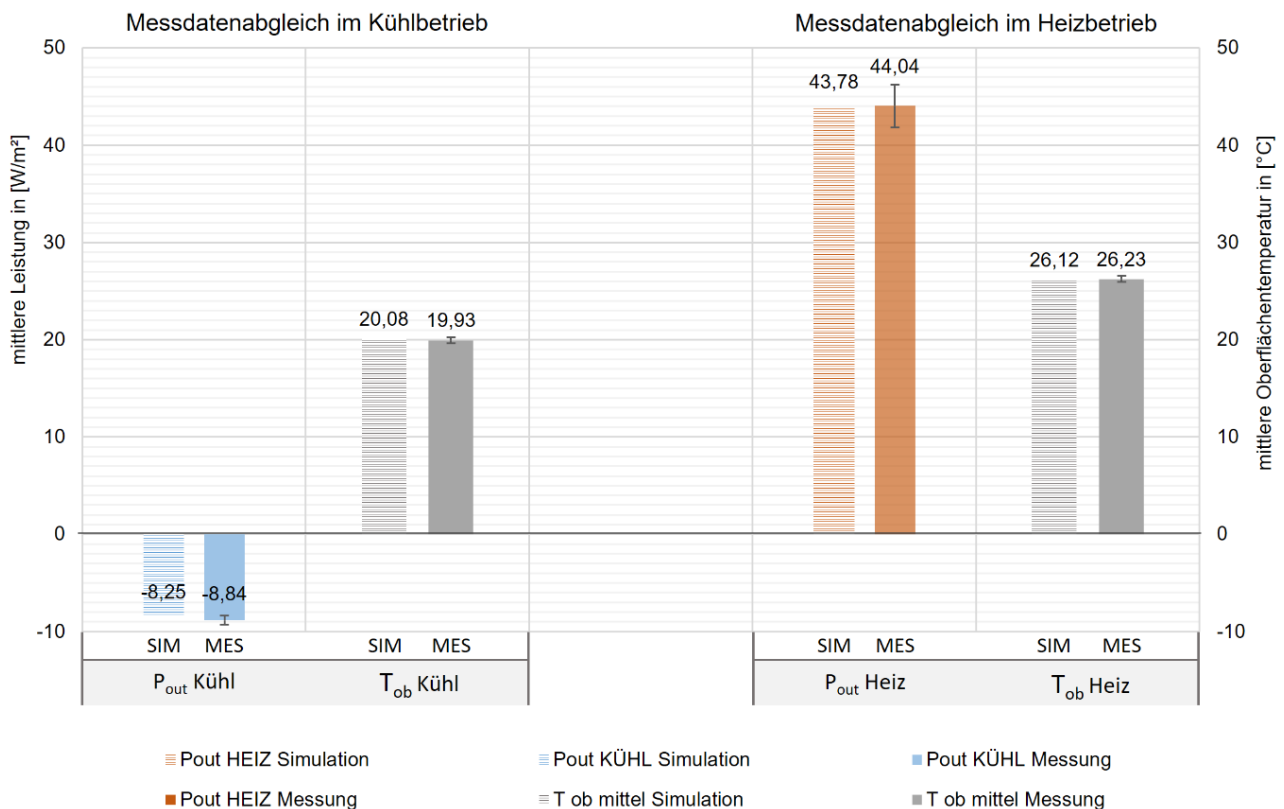


Abbildung 5.15: Gegenüberstellung der gemittelten Werte aus Simulation und Messung im stationären Zustand; linke Hälfte Kühlbetrieb, rechte Hälfte Heizbetrieb; je Säulenpaar: links Simulation, rechts Messung; in Anlehnung an (Vitopoulou 2018)

Da die Abweichung zwischen den zeitlich gemittelten Werten geringer ist als die durch Fehlerindikatoren in den rechten Säulen angegebenen Messunsicherheiten der verwendeten Sensoren, kann von einer Validität des Simulationsmodells im stationären Zustand ausgegangen werden.

Dies gilt sowohl für die mittlere Oberflächentemperatur als auch für die mittlere Wärmestromdichte im Heiz- und im Kühlbetrieb.

Als nächstes soll der instationäre Betriebswechsel betrachtet werden. Abbildung 5.16 zeigt die gemessenen und simulierten zeitlichen Verläufe der Wärmestromdichte und der mittleren Temperatur an der Bauteiloberfläche. Es werden die folgend genannten vier Betriebswechsel aus Abbildung 5.14 aufgeführt:

- die Abschaltung des Kühlbetriebs am 18.05.2018,
- die Aktivierung des Kühlbetriebs am 21.05.2018,
- der Betriebswechsel von Kühlen auf Heizen am 23.5.2018 und
- der Betriebswechsel von Heizen auf Kühlen am 29.05.2018

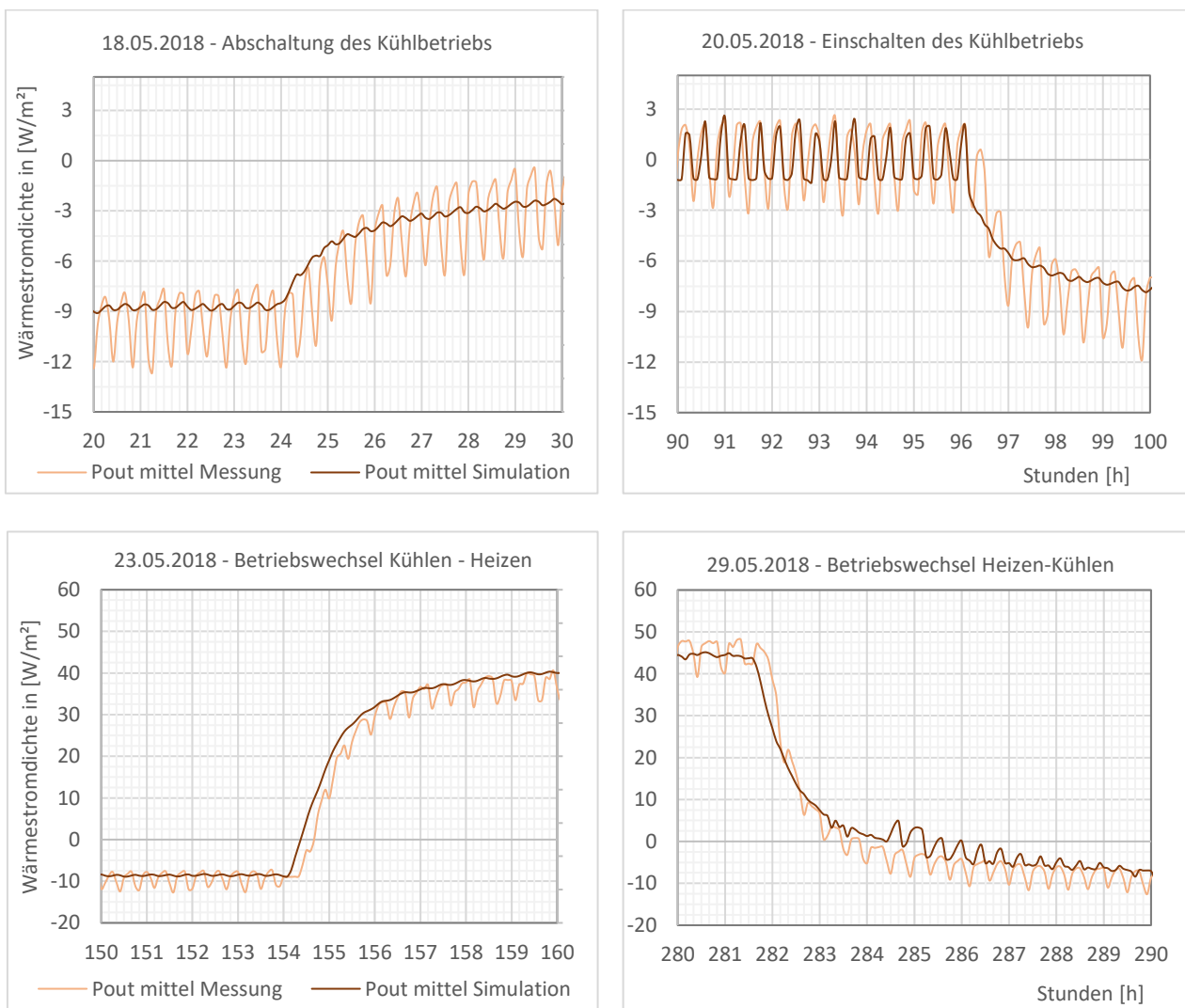


Abbildung 5.16: zeitliche Verläufe der mittleren gemessenen und simulierten Wärmestromdichte bei unterschiedlichen instationären Betriebswechseln

Der Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Daten während der instationären Betriebswechsel hat gezeigt, dass das numerische Modell nicht nur den stationären, sondern auch den instationären Zustand mit großer Übereinstimmung beschreiben kann. Ferner fällt auf, dass die gemessenen Verläufe den simulierten Verläufen stets ca. 15 Minuten nacheilen. Es wird vermutet, dass diese zeitliche Verzögerung durch die Art der numerischen Berechnung oder durch eine größere thermische Speichermasse begründet werden kann. Diese Vermutung führt direkt zu der Frage nach der Herkunft dieser Abweichung. In Frage kommen:

- eine nicht ausreichende räumliche Diskretisierung des Knotengitters oder
- eine höhere sensibel-thermische Speichermasse des Holzes als der nach (Niemz/Sonderegger 2017) angenommene Wert von 1630 kJ/kgK oder
- eine in der thermischen Simulation nicht berücksichtigte latent-thermische Speichermasse des Holzes. Es kann angenommen werden, dass beispielsweise bei der Temperaturerhöhung der raumseitigen Holzoberfläche vermehrt sortierte Wassermoleküle in den gasförmigen Aggregatzustand übergehen und dafür der Oberfläche Wärme entziehen. Dieser Effekt dauert solange an, bis das thermodynamische Gleichgewicht zwischen Sorption und Desorption nach dem Betriebswechsel des thermisch aktivierten Elements wiederhergestellt ist.

Es wird empfohlen, im Rahmen weiterführender Untersuchungen diese beiden Hypothesen zu prüfen. Sollte sich eine der beiden Vermutungen bestätigen, könnte eine dementsprechende Anpassung des thermischen Modells in Frage kommen.

6 Leistungsbetrachtung thermisch aktivierter Massivholzelemente

6.1 Erläuterung zur Struktur der Leistungsbetrachtung

Das Kapitel 6 widmet sich der systembedingt erreichbaren und extern limitierten Leistungsfähigkeit von thermisch aktivierten Massivholzelementen. Es soll dem Leser dieser Arbeit eine anhand von Beispielen veranschaulichte Leistungsbetrachtung bieten, um das Potenzial der entwickelten Technologie einschätzbar zu machen. Beginnend wird auf limitierende Faktoren der Konstruktion eingegangen. Dazu zählen die maximal bzw. minimal zulässigen Holzfeuchtwerte, durch die schädigende Zustände im Brettsperrholz vermieden werden. Für die Bestimmung von holzfeuchtebedingten Leistungsgrenzen wurden zwei Ansätze gewählt:

- 1.) Ein stationärer Ansatz mittels HX-Diagramm für feuchte Luft und ein Sorptionsisothermendigramm zur Abschätzung von Raumklima- und oberflächentemperaturabhängigen kritischen Holzfeuchtwerten.
- 2.) Ein instationärer Ansatz mittels numerischer Simulation zur Bestimmung von maximal zulässiger flächenspezifischer Systemleistung im Heiz- und im Kühlbetrieb.

Ferner wird auf die Anforderungen des Raumklimas und der thermischen Behaglichkeit verwiesen. Diese betreffen die in Abschnitt 2.6.2 erläuterten maximal zulässigen Oberflächentemperaturen und daraus resultierende Strahlungstemperaturasymmetrien.

Im zweiten Teil des Kapitels soll die von den Elementen erreichbare Leistung diskutiert werden. Die Betrachtung soll dabei auf zwei Ebenen stattfinden:

- 1.) Auf Bauteilebene soll, losgelöst vom konkreten Anwendungsszenario, die flächenspezifische Systemleistung, in Abhängigkeit von der Vorlauftemperaturüberhöhung mit ähnlichen am Markt etablierten Systemen verglichen werden.
- 2.) Auf Raumebene soll das System mittels numerischer Simulation für ein konkretes Anwendungsszenario ausgelegt und in seiner klimatisierenden Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden.

6.2 Leistungsgrenzen

6.2.1 Stationärer Ansatz zur Bestimmung von holzfeuchtebedingten Leistungsgrenzen

Die wechselseitige Abhängigkeit zwischen der thermischen Leistung des Systems, den Temperatur- und Feuchtezuständen im Holz sowie dem beeinflussten und beeinflussenden, angrenzenden Raumklima gehören zu den nicht trivialen Inhalten dieser Arbeit. Geringe Holzfeuchtwerte im Heizbetrieb bedingen, insbesondere bei sehr trockenen Raumluftzuständen, ein Schwinden des Holzes an der raumseitigen Oberfläche. Schwindrisse oder großflächige Verformungen des Brettsperrholzelements können, wie bei Holzdielen auf einer Fußbodenheizung, bei großen Heizleistungen im Winter auftreten. Im Sommer dagegen sind hohe Holzfeuchtwerte und das daraus folgende Quellen des Holzes ein Problem bei hohen Raumluftfeuchten und geringen Oberflächentemperaturen.

In der Abbildung 6.1 werden Temperatur- und Luftfeuchte-Randbedingungen festgelegt. Es wird angenommen, dass sich die saisonal schwankenden Raumluftzustände in dem markierten Feld in der Mitte des Diagramms bewegen.

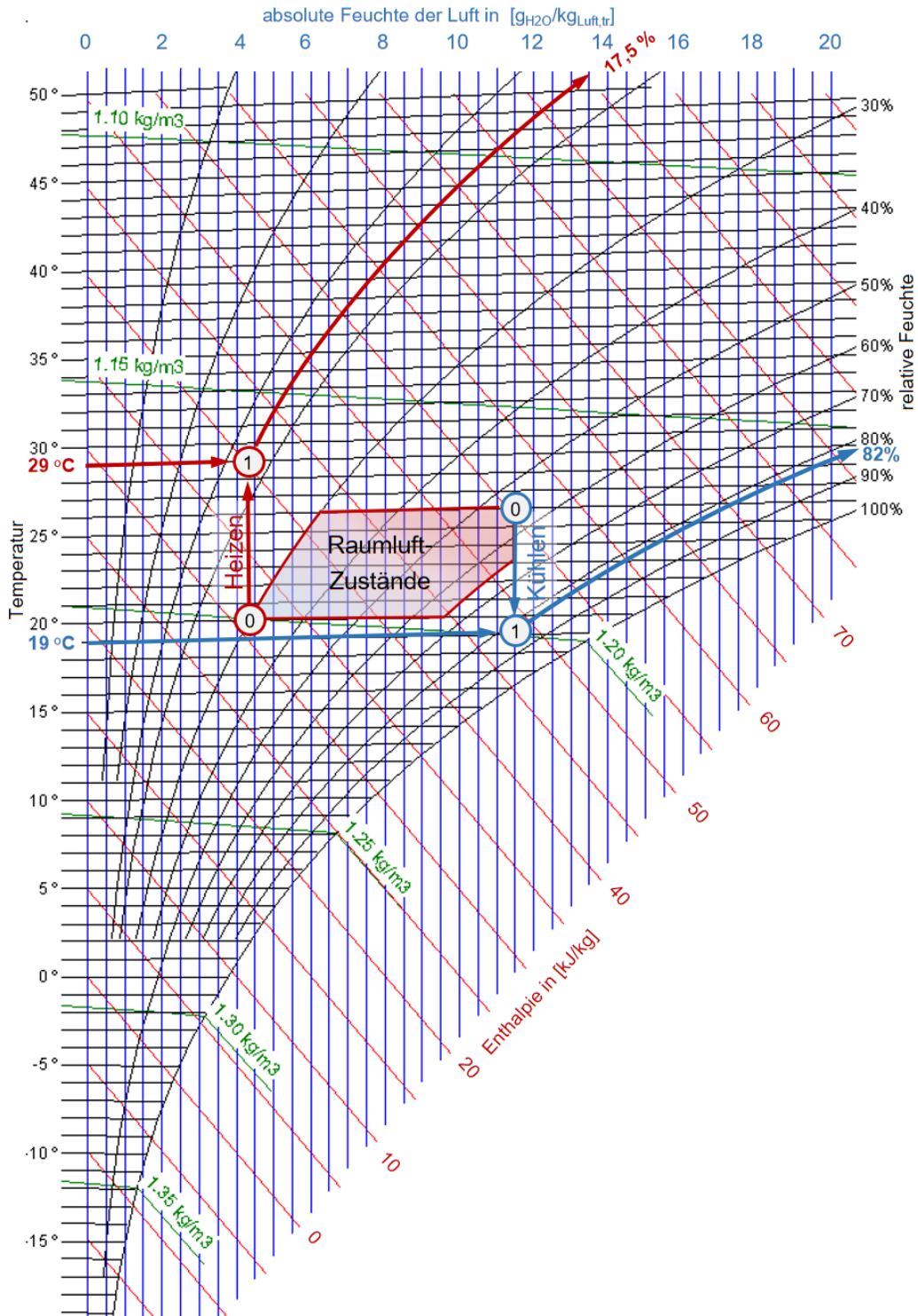


Abbildung 6.1: Zustandsänderungen der Raumluf an der thermisch aktivierten Oberfläche; Rot: Heizbetrieb; Blau: Kühlbetrieb für 1,013 bar; in Anlehnung an: (Dolder 2019)

Für die Betrachtung des Heiz- und des Kühlbetriebs werden jeweils die zu erwartenden, kritischen trockenkühlen bzw. die feuchtwarmen Raumluftzustände beheizter Innenräume angesetzt. Den Ausgangszustand ‚0‘ für den Heizbetrieb definiert eine Raumlufttemperatur von 20,0 °C und eine sehr geringe relative Raumluftfeuchte von 30,0 % bzw. 4,25 g_{H₂O}/kg_{Luft}. Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 erläutert, erfährt die Raumluft an der thermisch aktivierten Oberfläche eine Zustandsänderung $0 \xrightarrow{x=const} 1$. Im Heizbetrieb wird diese von 20 °C in der Grenzschicht auf annähernd die Temperatur der Oberfläche erwärmt. Entsprechend Abschnitt 4.3.2 sind das 29,0 °C. Unter der Annahme einer isohumiden Zustandsänderung ($x=const.$) reduziert sich die relative Luftfeuchte auf 17,5 %. Im Kühlbetrieb wird ein feuchtwarmes Innenraumklima angesetzt. Die Luft kühlt sich an der aktivierten Oberfläche von 26 °C und 11,5 g_{H₂O}/kg_{Luft} auf annähernd 19 °C ab. Die relative Luftfeuchte steigt dabei auf ca. 82 %. Als nächstes werden die kritisch trocken-warmen und kritisch feucht-kühlen Zustände auf das aus Abschnitt 2.3.3 bekannte Sorptionsisothermendiagramm für Fichtenholz angewendet.

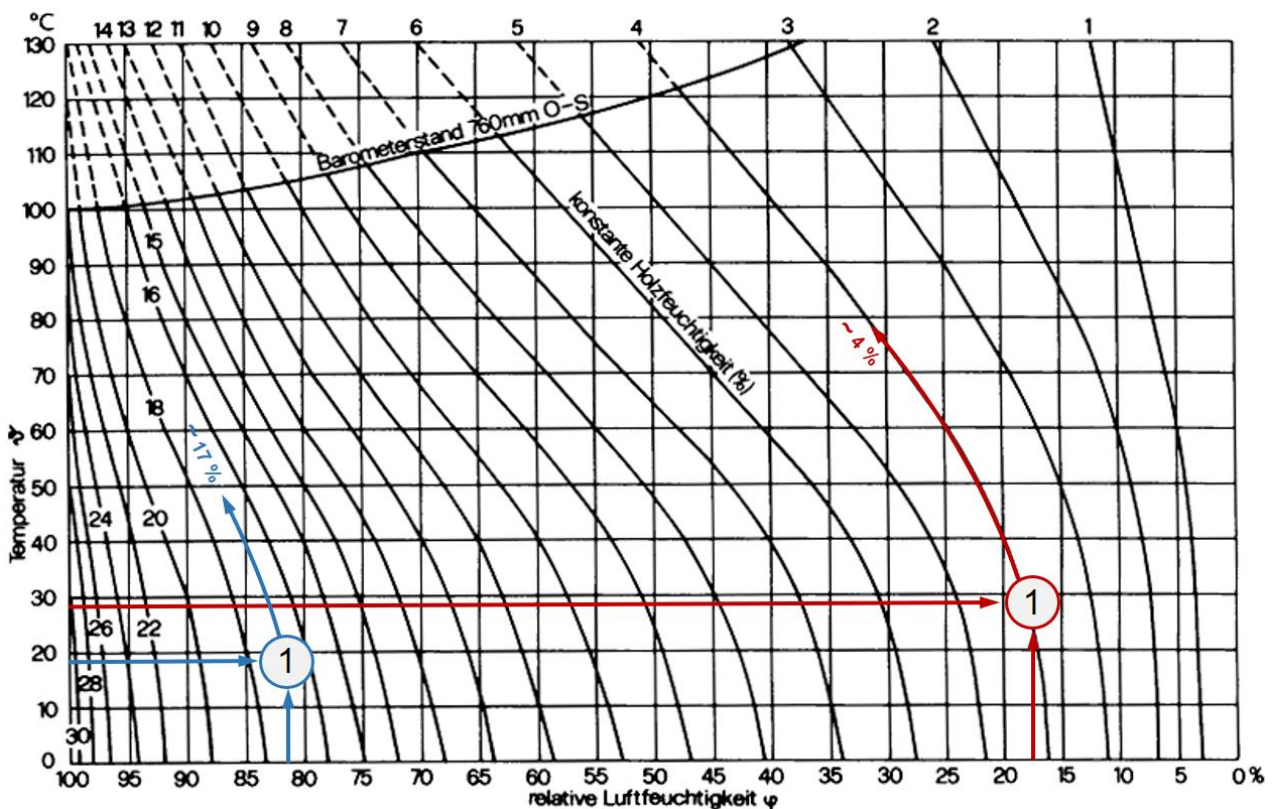


Abbildung 6.2: Prognostizierte minimale und maximale Holzgleichsfeuchte im Heiz- und im Kühlbetrieb; Sorptionsisothermendiagramm aus: (Niemz 1993), (Hawley, L., F. 1931), (Keylwerth 1949) vgl. Abschnitt 2.3.3

Mit Hilfe des Sorptionsisothermendiagramms können bei Kenntnis der Temperatur und der relativen Luftfeuchte die stationären Holzgleichsfeuchten abgeschätzt werden. Klarstellend sei erwähnt, dass es keinen unmittelbar kausal-physikalischen Zusammenhang zwischen der relativen Feuchte der Luft und der Holzfeuchte gibt.

Stattdessen ist das Gleichgewicht zwischen Sorption und Desorption von Wassermolekülen an der spezifischen Holzoberfläche vom lokalen Energieniveau, respektive von der Temperatur, und dem Vorhandensein von bereits sortierten und von noch dampfförmigen Wassermolekülen, sprich dem Wasserdampfpartialdruck, abhängig. Nichtsdestotrotz lässt sich der empirische Zusammenhang in dem Diagramm für eine Abschätzung der Holzgleichsfeuchte nach Erreichen des stationären Zustandes nutzen. Bei den in Abbildung 6.1 festgelegten Raumluftzuständen und unter Anwendung des in Abbildung 6.2 gezeigten Diagramms ergibt sich ein zu erwartendes Spektrum der Holzfeuchte $\sim 4\% < u < \sim 17\%$. Dem zugrunde liegen die Heiz- und Kühlleistungen und Oberflächentemperaturen, welche in den in Kapitel 4.3 beschriebenen Versuchen gemessen wurden.

Stellungnahme zum Heizbetrieb: Die den Heizbetrieb betreffende Aussage wird unter der Annahme des in Abbildung 6.1 angesetzten Raumklimas als plausibel und aussagekräftig eingeschätzt, da die erreichte Oberflächentemperatur des thermisch aktivierten Elements bereits das als noch behaglich angesehene Maximum erreicht hat. Es wird daher angenommen, dass im bestimmungsgemäßen Betrieb keine höheren Leistungen, bzw. keine höheren Oberflächentemperaturen eingestellt werden. Der ermittelte Holzfeuchtwert von $u \cong 4\%$ im Heizbetrieb kann als unterer planmäßig erreichbarer Grenzwert angesehen werden.

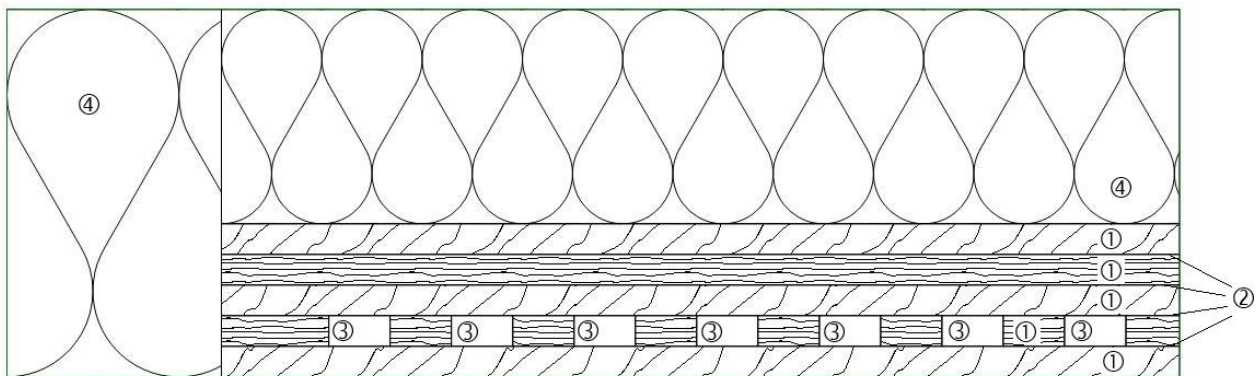
Stellungnahme zum Kühlbetrieb: Obwohl die für den Kühlbetrieb angenommenen Raumluftzustände geringere relative und absolute Luftfeuchten aufweisen als im Labor während der Kühlversuche vorherrschte, konnten in den Messdaten keine entsprechend hohen Holzfeuchten beobachtet werden. Es wird vermutet, dass dies auf die geringe Kühlleistung zurückzuführen ist. Diese musste, wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben, aufgrund des Taupunktkriteriums limitiert werden. Ferner wird vermutet, dass eine über viele Monate hinweg betriebene Kühlleistung an der Grenze des Taupunktkriteriums, bei schwül-warmen Raumluftzuständen, höhere Holzfeuchtwerte hervorrufen kann.

Die oben beschriebene Betrachtung der Holzfeuchtezustände gilt lediglich für den stationären Zustand der Holzfeuchte. Dieser kann unter Umständen erst nach Monaten oder Jahren erreicht werden (Henschen 2018). Zusätzlich ist die Aussage der stationären Betrachtung dadurch eingeschränkt, dass diese einen Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur der thermisch aktivierten Massivholzelemente, dem Raumluftzustand und der Ausgleichsholzfeuchte beschreibt. Für einen Rückschluss auf die maximal zulässige Heiz- und Kühlleistung, welche für die technische Regelung des Systems von Interesse ist, sind weitere Berechnungen notwendig. Darüber hinaus kann ein dauerhafter Betrieb des Systems unter Maximalleistung als unwahrscheinlich angesehen werden. Zeitweise Systemabschaltungen oder Teillastbetriebe wirken sich regenerativ und somit positiv auf die Holzfeuchteentwicklung aus. Die stationäre Betrachtung kann somit als tendenziell konservativ angesehen werden.

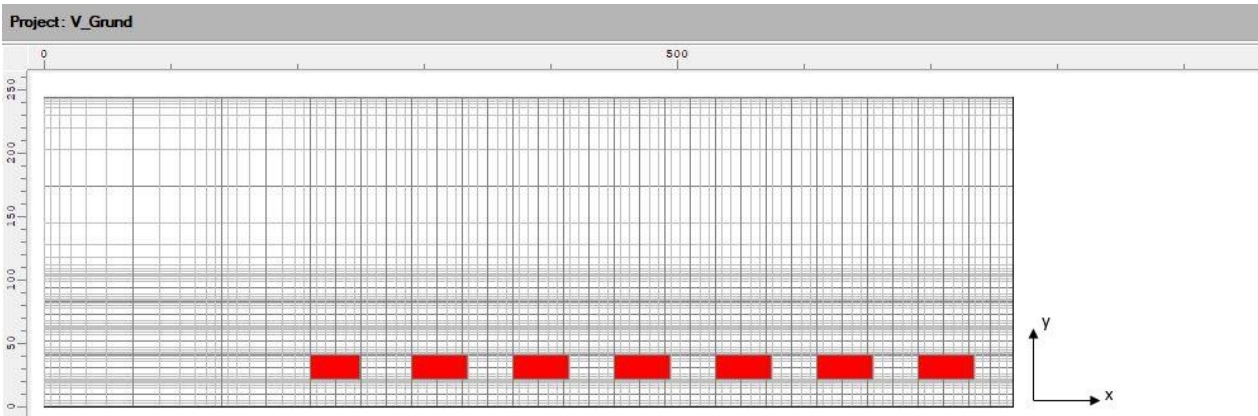
6.2.2 Instationärer Ansatz zur Bestimmung von Holzfeuchtebedingten Leistungsgrenzen

Im Rahmen einer instationären, gekoppelten Wärme- und Feuchteberechnung mit dem Simulationsprogramm WUFI 2D (Künzel 2018) wird der in Abbildung 6.3 gezeigte, als repräsentativ angesehene zweidimensionale Querschnitt des thermisch aktivierten Massivholzelements berechnet. Die Wahl der repräsentativen Schnittposition richtet sich nach der in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Mittelung

der Temperatur- und Leistungsverläufe entlang der abgewickelten Strömungsweglänge sowie nach der Position der Messensoren. Das Hauptziel der gekoppelten Wärme- und Feuchtesimulation ist, die sich einstellenden Holzfeuchtwerte als Funktion der spezifischen Heiz- und Kühlleistung auszudrücken und somit wichtige Informationen für die technische Regelung der thermisch aktivierten Massivholzelemente zu gewinnen. Die simulationsgestützte Untersuchung fand im Rahmen einer Masterarbeit (Henschen 2018) statt. Weiterführende Informationen zum Aufbau und zur Validierung des numerischen Modells können (ebd.) entnommen werden. In der Simulation wird im Heiz- und im Kühlbetrieb ein Umgebungsklima von 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte angenommen.



1 – Fichtenholz; longitudinal/radial 2 – Einkomponenten-Polyurethan-Klebstoff
 3 – Luftkanal 4 – Holzfaserdämmung



ID	Type	X [mm]	Y [mm]	Width [mm]	Height [mm]
Kanal 1	Heat Source	210	21	40	20
Kanal2	Heat Source	290	21	40	20
Kanal 3	Heat Source	370	21	40	20
Kanal 4	Heat Source	450	21	40	20
Kanal 5	Heat Source	530	21	40	20
Kanal 6	Heat Source	610	21	40	20
Kanal 7	Heat Source	690	21	40	20

Abbildung 6.3: Schnittdarstellung und 2D-Modell der hygrisch-thermischen Simulation in WUFI-2D

Abbildung 6.3 zeigt im oberen Teil den modellierten Bereich des Querschnitts in der linken Elementhälfte. Besonderen Diskussionsbedarf bringen die Klebefugen.

Während diese in der rein thermischen Simulation nicht berücksichtigt werden, kommt ihnen im hygrischen Modell große Wichtigkeit zu, da der Klebstoff eine signifikant höhere Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl hat als das umgebende Holz. Die Schichtstärke der Klebefugen beträgt ca. 1/10 mm. Da diese geringe Elementgröße in der Simulation zu numerischen Fehlern führt, wird die Stärke der Klebefugen auf 1 mm vergrößert. Kompensierend wird die Wärmeleitfähigkeit um denselben Faktor vergrößert. Die Rohdichte und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl werden um denselben Faktor reduziert. Die übrigen Materialien werden anhand der Herstellerangaben bzw. Angaben der programmeigenen Materialdatenbank modelliert. Eine weitere Besonderheit ist die Modellierung der thermisch aktivierenden Systemluftkanäle. Die Systemluft wird in einem geschlossenen Kreislauf durch das Element und die Luftkonditionierungseinheit geführt und funktioniert daher weder als Feuchtequelle noch als Feuchtesenke. Stichprobenartige Kontrollen des Wasserdampfpartialdrucks an der Ein- und an der Ausströmöffnung bestätigen diese These. Die Kanäle, im Schnitt oben rot dargestellt, werden daher als sensibel-thermische Senken bzw. Quellen modelliert. Zur Reduktion der Komplexität des Simulationsmodells und des Rechenaufwandes wird nur die linke Elementhälfte eingegeben. Da die konditionierte Systemluft links unten in das Element strömt, stellt aufgrund der dort höheren spezifischen Systemleistung die linke Elementhälfte die kritische Seite des Elements dar. Bei der Ermittlung der kritischen Leistung wird nur dieser Bereich betrachtet. Um den Einfluss der thermischen Leistung auf die sich ergebende Holzfeuchte bestimmen zu können, werden konstante Klimarandbedingungen vorausgesetzt. Die thermische Leistung wird in fünf Watt je Quadratmeter-Schritten variiert. Die sich ergebene stationäre Ausgleichsholzfeuchte kann der Ordinate in Abbildung 6.4 entnommen werden.

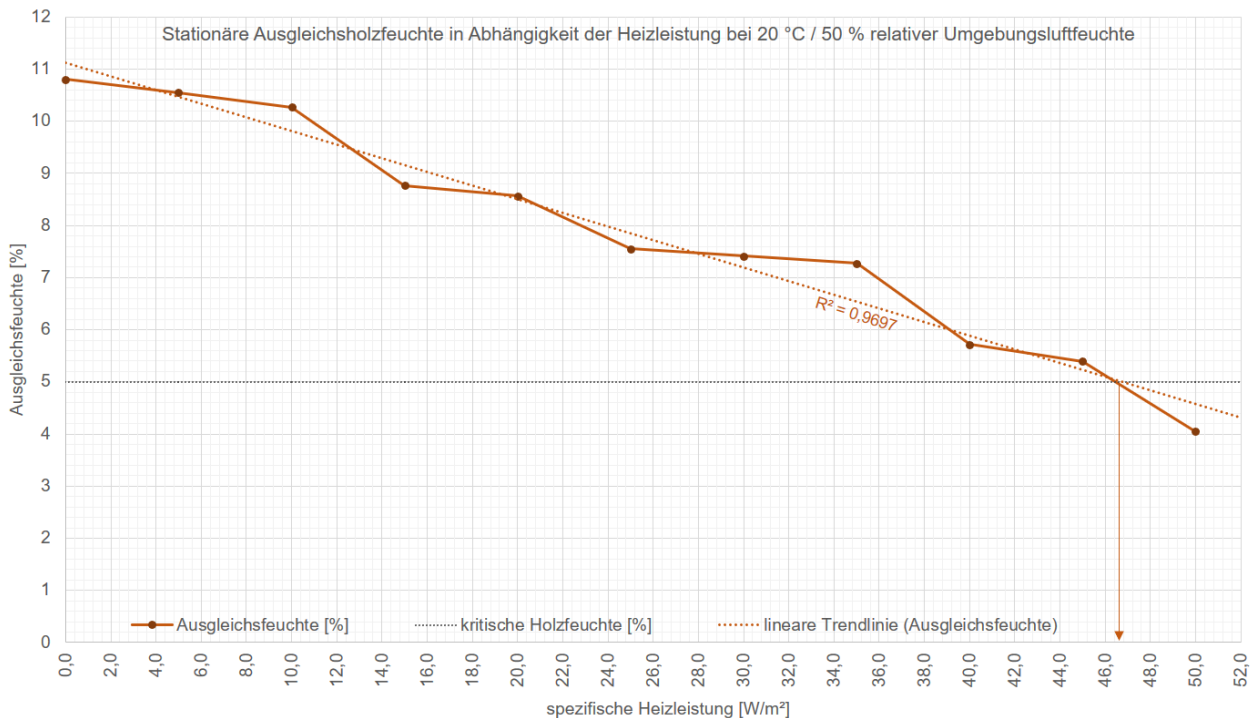


Abbildung 6.4: Abhängigkeit zwischen spezifischer Heizleistung und resultierender Holzfeuchte in 40 mm bei einem Umgebungsklima von 20°C / 50 % relativer Luftfeuchte (Henschen 2018)

Den Simulationsergebnissen entsprechend kann bei einer Lufttemperatur von 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte im Heizbetrieb eine dauerhafte thermische Leistung von 46 W/m² betrieben werden. Die Simulation einer kurzzeitig überhöhten Heiz- und Kühlleistung erbrachte in der WUFI-Simulation keine plausiblen Ergebnisse. Aus Sicherheitsgründen wird bis auf weiteres die dauerhaft mögliche Systemleistung als zulässige Spitzenleistung benannt. Es wird vermutet, dass eine leichte Überhöhung der Kühlleistung unter Einhaltung des Taupunkt Kriteriums und eine größere Überhöhung der Heizleistung zu Spitzenlastzeiten unter Annahme einer anschließenden Regenerationsphase nicht zu Schädigungen des Elements führen werden. Sämtliche Berechnungen und Überlegungen zur Entwicklung der Holzfeuchte bewegen sich im hygrokopischen Bereich deutlich unterhalb des Fasersättigungspunktes. Es muss in jedem Fall darauf geachtet werden, dass die thermisch aktivierten Massivholzelemente, wie auch alle vergleichbaren Wandtemperierungssysteme, im Kühlbetrieb an deren raumseitiger Oberfläche nicht bis auf die Taupunkttemperatur der Raumluft abgekühlt werden. Dies würde bei sämtlichen bauteilintegrierten Wandtemperierungssystemen zu Bauschäden führen und muss regelungstechnisch ausgeschlossen werden. Dies ist Stand der Technik.

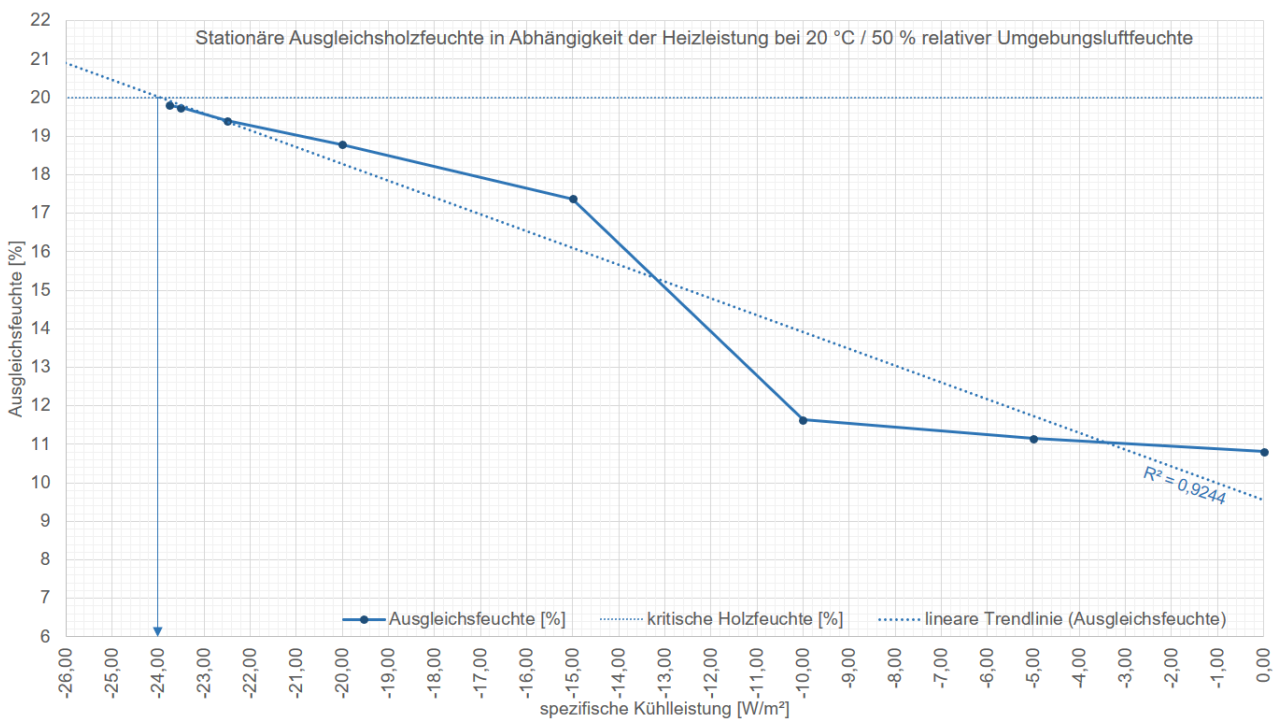


Abbildung 6.5: Abhängigkeit zwischen spezifischer Kühlleistung und resultierender Holzfeuchte in 40 mm bei einem Umgebungsklima von 20°C / 50 % relativer Luftfeuchte (Henschen 2018)

Analog wird die maximal dauerhaft zulässige Kühlleistung bei einem Raumklima von 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte an der Elementoberfläche bestimmt. Die als kritisch angesehene maximale Holzfeuchte beträgt 20 %. Hieraus ergibt sich eine als maximal zulässig angesehene Kühlleistung von -24 W/m². Sofern unter Umständen niedrigere oder höhere Holzfeuchten als zulässig angesehen werden können, kann mit den zuvor beschriebenen Diagrammen die zugehörige Heiz- und Kühlleistung ermittelt werden.

6.3 Leistungsbetrachtung auf Bauteilebene

6.3.1 Erläuterung zum Aufbau des Abschnitts

Nach dem die Limitationen der thermischen Leistung im obigen Abschnitt diskutiert wurden, soll der folgende Abschnitt dokumentieren, welche thermische flächenspezifische Leistung von den Elementen erbracht werden kann. Die Betrachtung soll auf Bauteilebene stattfinden und die spezifische Heiz- und Kühlleistung der beiden Prototypen A und B mit zwei am Markt etablierten Flächenheiz- und Kühlsystemen vergleichen. Bei den beiden Referenzsystemen handelt es sich um wasserführende Systeme mit unterschiedlichem Aufbau, die raumseitig auf ein Brettsper Holzwandelement o. a. aufgebracht werden können. Eine Modellvalidierung der beiden Referenzsysteme kann der Masterarbeit (Baumgartner 2018) entnommen werden. Einige der in diesem Abschnitt gezeigten Abbildungen sind in Anlehnung an (ebd.) erstellt worden. Die Simulationen finden unter exakt gleichen thermischen Randbedingungen statt. Die beiden Vergleichsvariablen 1.) die mittlere flächenspezifische Wärmestromdichte und 2.) die mittlere Oberflächentemperatur werden als Funktion der Heizmittelübertemperatur bzw. der Kühlmitteluntertemperatur angegeben. Die Darstellung erfolgt in den beiden auf die Modelldokumentation folgenden Abbildungen.

6.3.2 Prototyp A eines thermisch aktivierten Massivholzelements

Die beiden Prototypen sind aus dem Verlauf der Arbeit bekannt und werden hier lediglich in ihrer numerischen Eingabe in das thermische Geometrie-Modell beschrieben. Dieses ist jeweils durch den orange gestrichelten Rahmen gekennzeichnet. Abseits des Rahmens ist der tatsächliche Aufbau des jeweiligen Systems dargestellt.

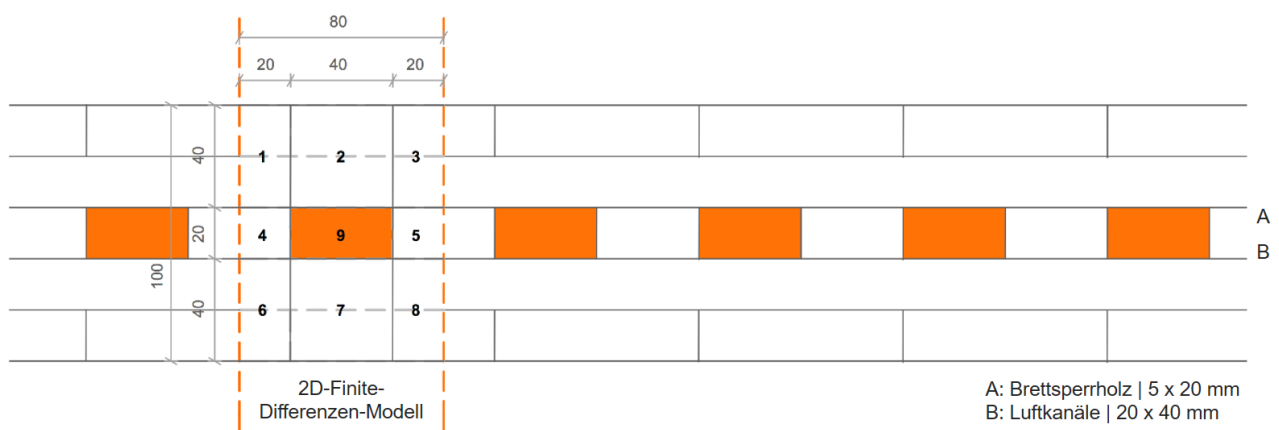


Abbildung 6.6: Reale Schnittdarstellung von Prototyp A mit Illustrierung des 2D-Knotenmodells

Das 2D-Finite-Differenzen-Modell ist mit neun Knoten aufgebaut, wobei es sich bei dem neunten Knoten um den thermisch aktivierenden Luftkanal handelt. Der modellierte Bereich kann, wie in Abschnitt 5.2 erläutert, unter Anwendung von Symmetrieannahmen, auf den 80 mm breiten Abschnitt reduziert werden.

In der Simulation wird dieser vervielfacht, um auf die tatsächliche Elementgröße zu kommen. Dabei wird, wie oben beschrieben, dem degressiven Temperatur- und Leistungsverlauf entlang der Strömungsweglänge Rechnung getragen.

In der folgenden Tabelle sind die thermischen Materialkennwerte der beiden prototypischen Probekörper A und B dargestellt.

Tabelle 6-1: Materialkennwerte für die thermische Modellierung von Prototyp A

Material	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	spezifische Wärmekapazität	Dichtespezifische Wärmekapazität
	[W/mk]	[kg/m ³]	[J/kgk]	[J/m ³ K]
Brettsperrholz ¹	0,11	470	1600	752000
Luft ²	-	1,099	1008	1107,8

¹ nach (Carstensen 2016) und (Binderholz GmbH 2019)² trockene Luft bei 30°C und 517m Höhe

Die Dichte der Luft wird für 30 °C und 517 m mittlere Meereshöhe (Höhe Untersuchungsstandort) angegeben, was einem Mittelwert aus Heiz- und Kühlbetrieb (16°C/45°C) entspricht. Da sich die beiden Prototypen lediglich in der Position der Luftkanäle unterscheiden, kann die Tabelle 6-1 für die beiden Prototypen A und B angewendet werden.

6.3.3 Prototyp B eines thermisch aktivierten Massivholzelements

Der prototypische Probekörper B unterscheidet sich vom Prototyp A lediglich in der Lage der thermisch aktivierenden Luftkanäle. Da Prototyp B mit nur 20 mm Fichtenholzüberdeckung eine deutlich höhere thermische Leistung erwarten lässt, wird dieser, wie in Abschnitt 3.3 eingeführt, als der leistungsorientierte der beiden Prototypen bezeichnet.

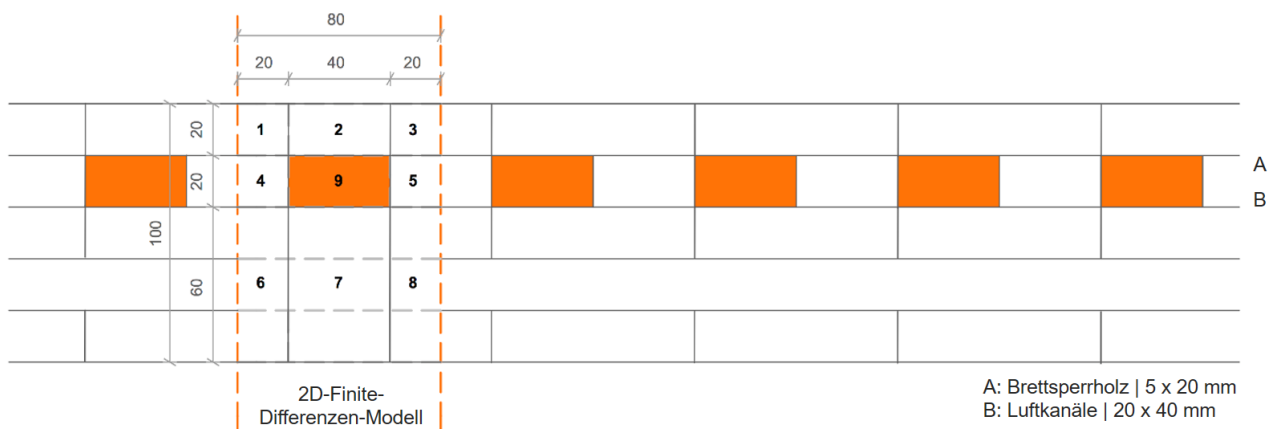


Abbildung 6.7: Reale Schnittdarstellung von Prototyp B mit Illustrierung des 2D-Knotenmodells

6.3.4 Referenzsystem A – Lehmputz-Wandheizung Nass

Als erstes Referenzsystem A wird eine nassverlegte Rohr-Wandheizung mit Lehmputz und putztragender Brettsperrholzunterkonstruktion gewählt.

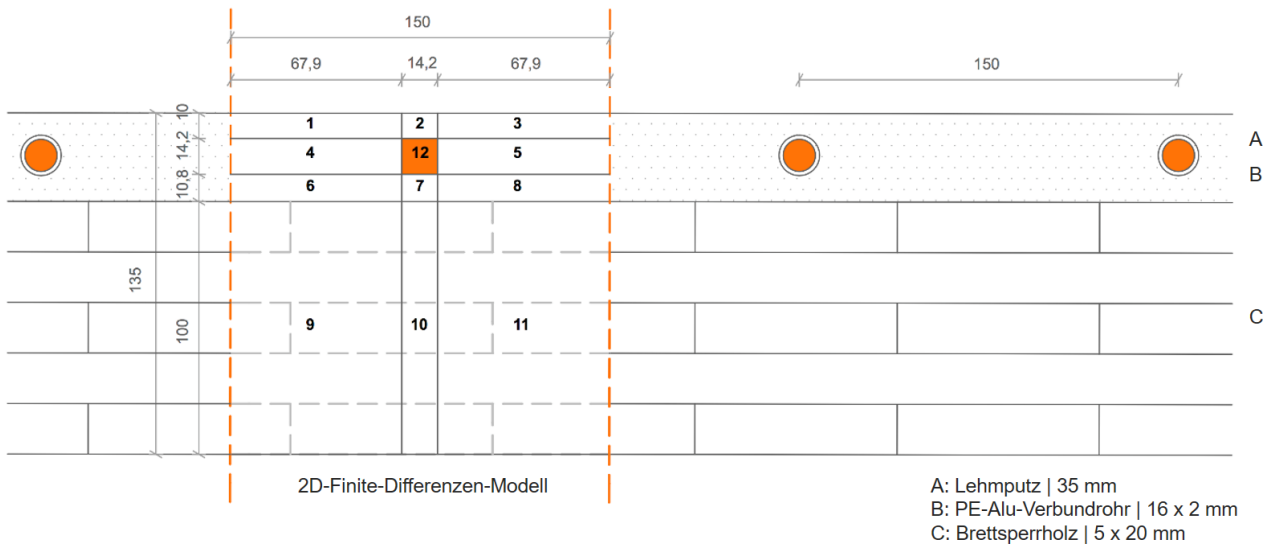


Abbildung 6.8: Reale Schnittdarstellung vom Referenzsystem A mit Illustrierung des 2D-Knotenmodells; Darstellung in Anlehnung an (Baumgartner 2018)

Bei dem Modell handelt es sich um eine Abbildung des Systems WEM-Wandheizung® des Herstellers (WEM GmbH 2017). Die thermische Aktivierung des Lehmputzes geschieht über wasserführende Mehrschichtverbundrohre, die mäanderförmig mit Abstandhaltern auf der Brettsperrholz-Unterkonstruktion befestigt sind. Somit können die Rohre vollumfänglich und wärmeschlüssig vom Lehmputz umfasst werden. Der gewählte Verlegeabstand von 150 mm orientiert sich an den Angaben des Herstellers. Gleichsam ist die Ausschnittsbreite des modellierten Bereichs an dieses Maß angepasst.

Tabelle 6-2: Materialkennwerte für die thermische Modellierung von Referenzsystem A

Material	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	spezifische Wärmekapazität	Dichtespezifische Wärmekapazität
	[W/mK]	[kg/m ³]	[J/kgK]	[J/m ³ K]
Brettsperrholz ¹	0,11	470	1600	752000
Wasser ⁵	-	996	4190	4173240
Lehmputz ^{2,3}	0,91	1700	1000	1700000
Heizrohr ⁴	0,42	-	-	-

¹ nach (Carstensen 2016) und (Binderholz Bausysteme GmbH); ² gemäß Herstellerangabe (WEM GmbH 2017); ³ nach U-Wert.net (U-Wert.net UG); ⁴ Annahme: Gleiche Eigenschaften wie Heizrohr im Trockensystem (Purmo DiaNorm Wärme AG 2017); ⁵ Wasser bei 30°C und Normaldruck

6.3.5 Referenzsystem B – Trockenbau Wandheizung mit Wärmeleitblechen

Das zweite Referenzsystem B bildet ein Trockenbau-Wandheizungssystem des Herstellers Purmo ab (Purmo DiaNorm Wärme AG 2017). Bei dem System werden wasserführende Mehrschichtverbundrohre mäanderförmig in eine Polystyrol-Dämmplatte eingelassen, die raumseitig mit einer Gipskartonplatte abgeschlossen wird. Zur Sicherstellung einer effektiven und gleichmäßigen Wärmeübertragung auf die Gipskartonplatte werden die Rohre in eine Wärmeleitvorrichtung aus Stahlblech eingepresst. Das gesamte System wird auf einer Brettsperrholzunterkonstruktion befestigt.

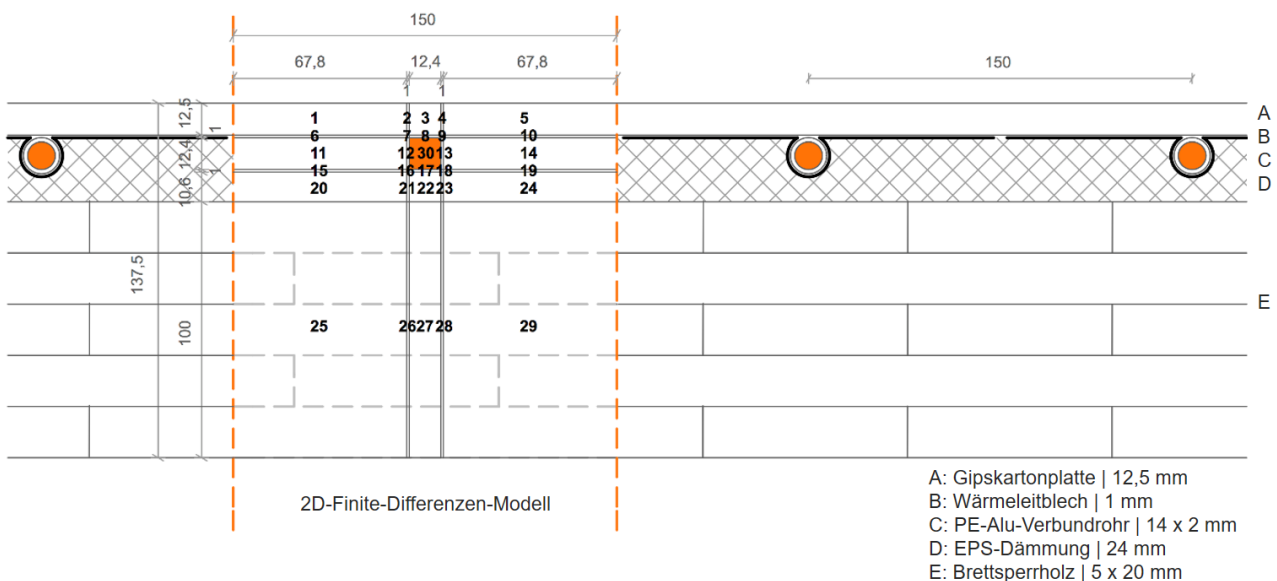


Abbildung 6.9: Reale Schnittdarstellung vom Referenzsystem B mit Illustrierung des 2D-Knotenmodells; Darstellung in Anlehnung an (Baumgartner 2018)

Die modellierte Ausschnittsbreite richtet sich wie bei dem Lehmputz-System nach den Herstellerangaben und beträgt 150 mm. Für die Darstellung der komplexen Geometrie der Wärmeleitbleche wird das System durch insgesamt 30 Knoten aufgelöst.

Tabelle 6-3: Materialkennwerte für die thermische Modellierung von Referenzsystem B

Material	Wärmeleitfähigkeit	Dichte	spezifische Wärmekapazität	Dichtespezifische Wärmekapazität
	[W/mK]	[kg/m ³]	[J/kgK]	[J/m ³ K]
Brettsperrholz ¹	0,11	470	1600	752000
Wasser ⁴	-	996	4190	4173240
Gipskarton-Platte ³	0,21	700	1000	700000
EPS-Dämmung ³	0,04	20	1450	29000
Stahlblech ³	50	7800	450	3510000
Heizrohr ²	0,42	-	-	-

¹ nach (Carstensen 2016) und (Binderholz Bausysteme GmbH; Binderholz GmbH 2019); ² gemäß Herstellerangabe (Purmo DiaNorm Wärme AG 2017); ³ nach DIN EN ISO 10456; ⁴ Wasser bei 30°C und Normaldruck

6.3.6 Leistungsvergleich auf Basis des Auslegungsdiagramms

Heizbetrieb

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Systemvergleichs auf Bauteilebene präsentiert. In Abbildung 6.10 sind die simulierten mittleren flächenspezifischen Heizleistungen der vier betrachteten Systeme auf der linken Ordinate über der Heizmittelübertemperatur aufgetragen. Die rechte Ordinate beziffert die mittleren Oberflächentemperaturen, bezogen auf eine operative Raumtemperatur von 20 °C.

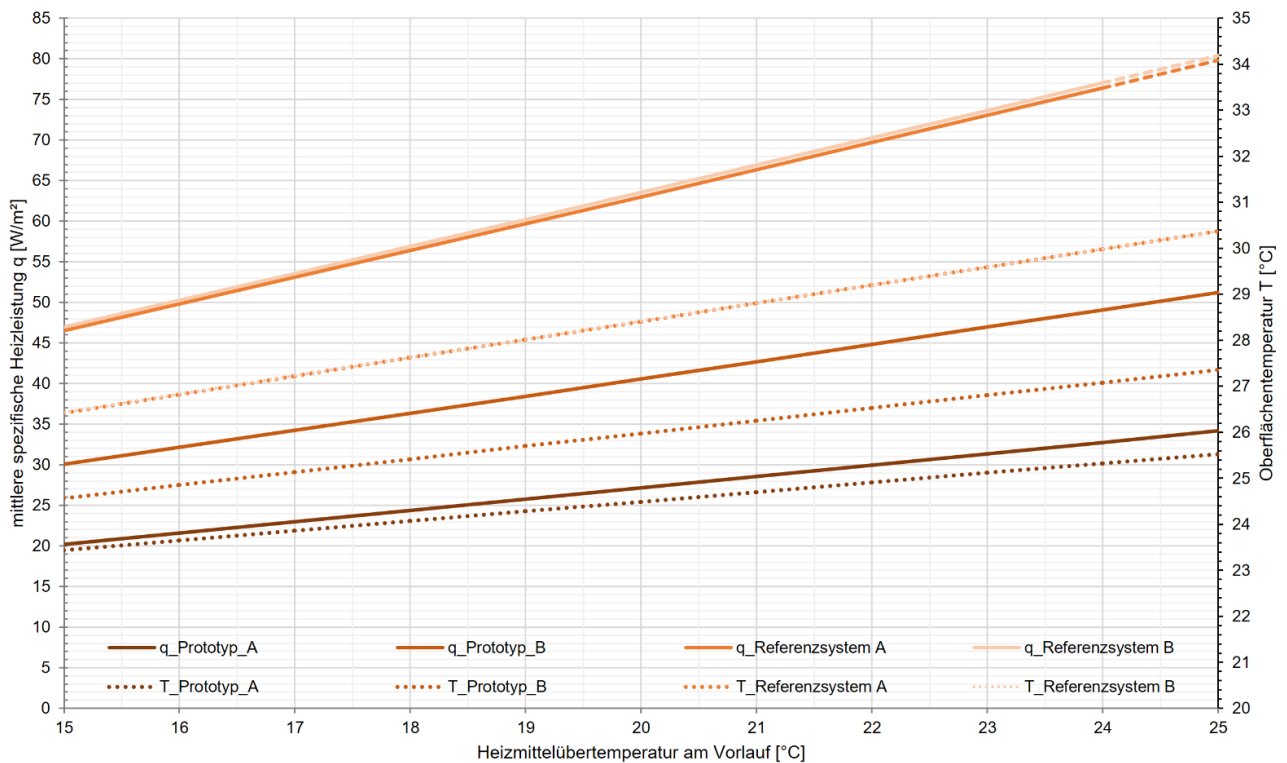


Abbildung 6.10: Systemvergleich im Heizbetrieb bei einer operativen Raumtemperatur von 20 °C Darstellung der mittleren flächenspezifischen Heizleistung und der mittleren Oberflächentemperatur als Funktion der Heizmittelübertemperatur

Der Prototyp A erreicht im Vergleich der vier betrachteten Systeme die geringste thermische Leistung. Bei einer Temperaturerhöhung von 20 K, das entspricht bei 20 °C-Raumtemperatur einer Vorlauftemperatur von 40 °C, beträgt dessen mittlere flächenspezifische Heizleistung ca. 24 W/m². Der Prototyp B leistet aufgrund der nur halb so dicken Holzüberdeckung bei gleicher Temperaturerhöhung ca. 40,5 W/m². Die beiden Referenzsysteme stellen sich als gleichwertig in ihrer Leistung heraus. Sie erreichen beide ca. 63,5 W/m². Die Vorteile durch die optimale Wärmeeinleitung in die Gipskartonplatte bei dem Trockenbausystem werden durch den etwas größeren Durchmesser bei dem Lehmbausystem kompensiert.

Bei Vorlauftemperaturüberhöhungen von 24 K, was in dem betrachteten Beispiel etwa 44 °C entspricht, erreichen die mittleren Oberflächentemperaturen der beiden Referenzsysteme die Behaglichkeitsgrenze von 30 °C bzw. eine Erhöhung um $\Delta T > 9 K$. Der darüber liegende Bereich der Leistungsgraphen ist daher gestrichelt dargestellt. Die mittleren Oberflächentemperaturen der Prototypen A und B liegen mit 25 °C und 27 °C deutlich unter der 9-K-Grenze. Eine weiter steigende Leistung beider Prototypen ließe sich durch eine höhere Vorlauftemperatur realisieren. Dabei sollte allerdings stets das primärenergetische Versorgungstemperaturniveau beachtet werden, um die Nutzung erneuerbarer Energien nicht einzuschränken.

Kühlbetrieb

Analog zur Heizleistungsbetrachtung wird in Abbildung 6.11 die mittlere flächenspezifische Kühlleistung auf der linken Ordinate und die mittlere Oberflächentemperatur auf der rechten Ordinate als Funktion der Kühlmitteluntertemperatur dargestellt. In dem simulierten Szenario beträgt die operative Raumtemperatur 27 °C.

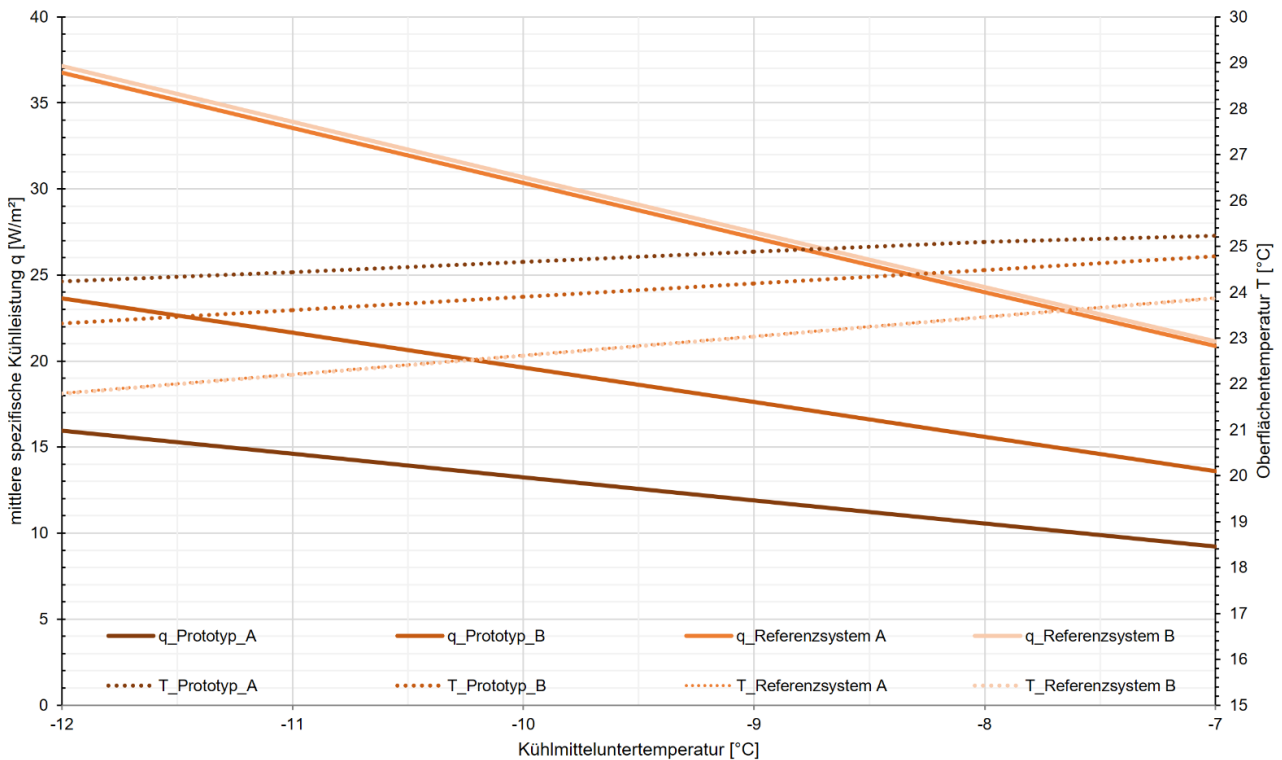


Abbildung 6.11: Systemvergleich im Kühlbetrieb bei einer operativen Raumtemperatur von 27 °C
 Darstellung der mittleren flächenspezifischen Kühlleistung und der mittleren Oberflächentemperatur als Funktion der Kühlmitteluntertemperatur

Wie bei der Heizleistung ist auch im Kühlbetrieb die thermische Leistung des Prototyp A die geringste im Vergleich. Sie beträgt bei einer Kühlmitteluntertemperatur von 9 K bzw. einer Vorlauftemperatur von 18 °C ca. 12 W/m².

Bei derselben Temperatur der Systemluft erreicht der Prototyp B knapp 18 W/m^2 . Beide Referenzsysteme liegen mit ca. 27 W/m^2 deutlich darüber. Mit den betrachteten Vorlauftemperaturen erreichen bei keinem System die mittleren Oberflächentemperaturen kritische Werte bezüglich des Tauwasserkriteriums bei den gegebenen Raumklimarandbedingungen. Auch die Anforderungen der thermischen Behaglichkeit gem. Abschnitt 2.6.2 sind bei allen Systemen eingehalten.

Zwischenfazit:

Verglichen mit den beiden Referenzsystemen erreichen Prototyp A ca. 45 % und Prototyp B ca. 65 % der thermischen Leistung bei gleichem Massenstrom und gleicher Vorlauftemperatur. Dieses Verhältnis zeigt sich sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb und setzt sich über die simulierten Systemtemperaturen fort. Die Leistungsunterschiede zwischen den Prototypen und den Referenzsystemen lassen sich primär durch den jeweiligen thermischen Widerstand zwischen den Luftkanälen bzw. den Rohren in der Konstruktion und der raumseitigen Oberfläche begründen. Während der Wärmefluss bei der Lehmwandheizung lediglich die Lehmschicht und bei dem Trockenbausystem die Gipskartonplatte als maßgebende Wärmewiderstände überwinden muss, sind bei Prototyp A ca. 40 mm und bei Prototyp B ca. 20 mm Fichtenholz zu durchfließen. Entsprechend hoch sind das erforderliche Temperaturgefälle bzw. die Leistungsminderung.

Für weitere Optimierungen der thermisch aktivierten Massivholzelemente wird aus diesen Betrachtungen heraus empfohlen, den thermischen Widerstand der raumseitigen Überdeckung der luftführenden Kanäle zu reduzieren. Ein Einbringen von Fremdmaterial, wie beispielsweise eines Wärmeleitblechs in das Brettsperrholzelement, sollte aus Gründen der Wieder- und Weiterverwendbarkeit des Baumaterials Holz nicht angestrebt werden. Stattdessen könnte dies beispielsweise durch die Verwendung einer deutlich dünneren Mehrschichtplatte, ggf. aus Holzarten mit höherer Wärmeleitfähigkeit, realisiert werden.

6.4 Leistungsbetrachtung auf Raumebene

6.4.1 Beschreibung des Referenzszenarios für die Leistungsbetrachtung auf Raumebene

Die abschließenden Abschnitte dieser Arbeit sollen dem Leser einen Eindruck davon verschaffen, wie das entwickelte System im räumlichen Zusammenhang eines als repräsentativ eingeschätzten Referenzszenarios¹⁷ funktioniert. Das Referenzszenario stellt ein mit zwei arbeitenden Personen besetztes Büro mit südlich orientierter Fassade mit 70 % Verglasung dar. In der Abbildung 6.12 ist das Doppelbüro im Grundriss und mit nebenstehenden raumklimatisch relevanten Eckdaten illustriert.

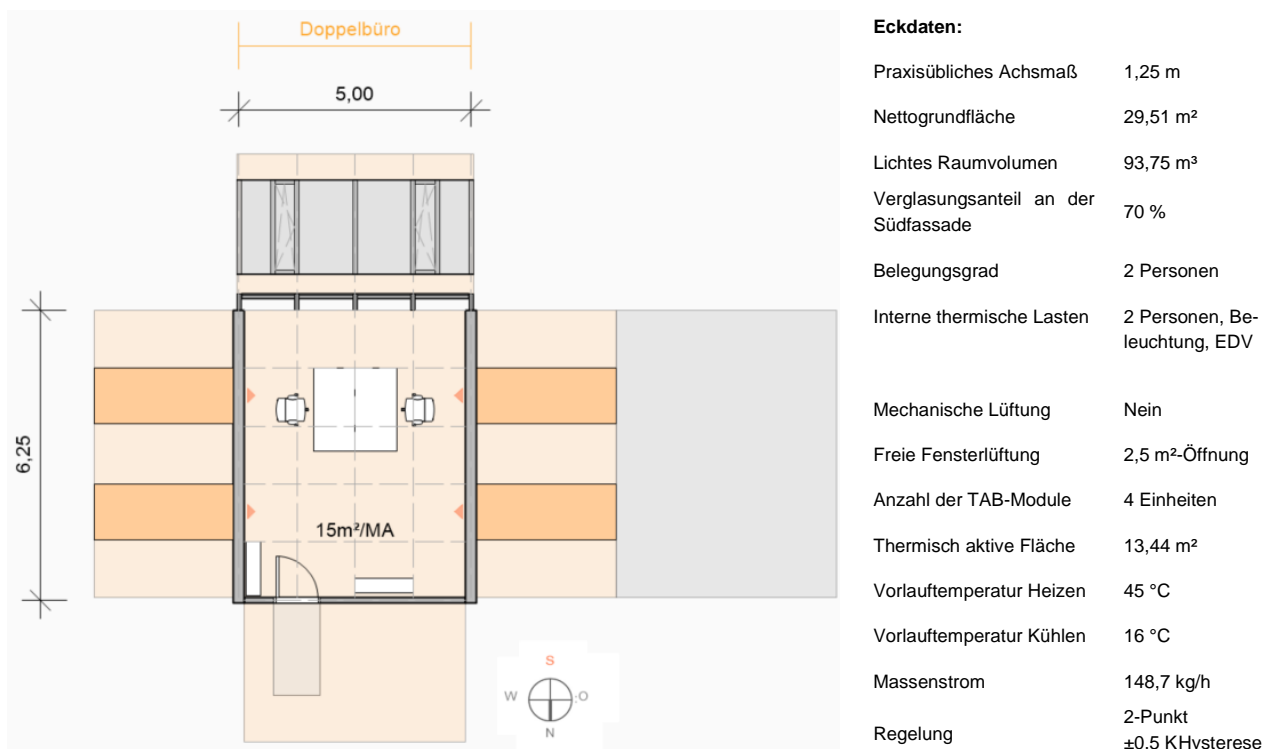
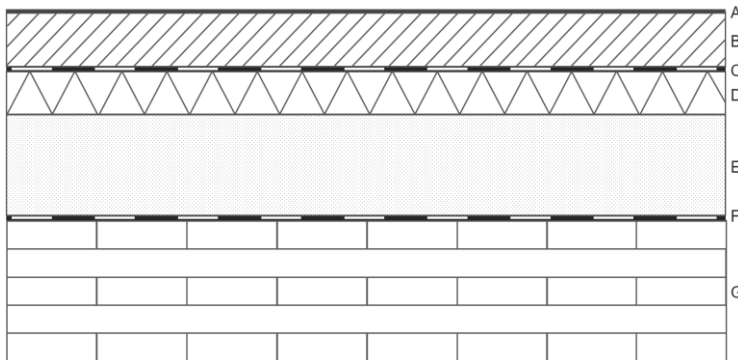


Abbildung 6.12: Grundriss und Eckdaten zum Referenzszenario ‚Doppelbüro‘ mit orange markierten Positionen der thermisch aktivierten Massivholzelemente

¹⁷ Die Definition dieses Szenarios basiert auf einer am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion durchgeführten Untersuchung zu zukünftigen Einsatzrahmenbedingungen für thermisch aktivierte Massivholzelemente im Jahr 2035. Die Definition der Randbedingungen betrifft: 1.) die Grundrissgestaltung künftiger Bürokonzepte, basierend auf einer am Fraunhofer Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation durchgeführte Studie zur zukünftigen Gestaltung von Büroumgebungen Bauer et al. (2018), 2.) die vom Deutschen Wetterdienst erarbeiteten Klimaprognosen für ein sogenanntes sommerwarmes, ein winterkaltes und ein mittleres Jahr 2035 und 3.) die Vorgaben der Versorgungsnetzstruktur im Jahr 2035.

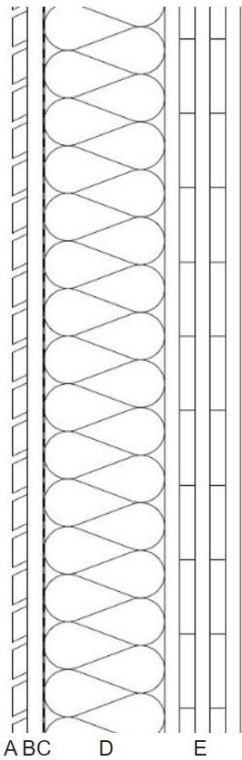
Das betrachtete Bürogebäude ist in Massivholzbauweise konstruiert. Die Konstruktion der Bauteile ist auf die Orientierungswerte des 'KfW-Effizienzhausstandards 55' ausgerichtet¹⁸. Wie schon in Abschnitt 3.2.3 erläutert, ist bei dieser Bauweise der nach Standardmaß gegliederte Grundriss ein wichtiges Planungsparadigma des Architekten. So kann das Bauwerk mit dem weitgehend vorgefertigten, standardisierten Produkt ‚Brettsperholz‘ verschnitt-sparend geplant und mit kohärent vereinfachter Systematik errichtet werden. Wie in dem obigen Grundriss gezeigt, wird ein 1250 mm Achs-Raster verwendet. Die Größensystematik der thermisch aktivierten Massivholzelemente ordnet sich dieser Systematik unter. Die Positionen der für die Beheizung und Kühlung des Doppelbüros notwendigen vier thermisch aktivierten Massivholzelemente befinden sich in den beiden Seitenwänden. In der Abbildung 6.12 sind diese orange hervorgehoben. Je nach erforderlicher Möblierung vor den Wänden ist gleichsam denkbar, die aktive Fläche auf einer Raumseite zu konzentrieren. Die Platzierung der thermisch aktivierten Elemente in den seitlichen Trennwänden ermöglicht eine einzelraumweise Regelung der abgegebenen thermischen Leistung. In dem betrachteten Beispiel sind die Trennwände zwischen den Bürozellen aus Schallschutzgründen doppelschalig mit innenliegender Dämmung ausgeführt. Der Aufbau der Trennwand kann dem in der folgenden *Abbildung 6.13* ganz rechts gezeigten Detail entnommen werden. Neben der Trennwand zeigt die Abbildung die realen Aufbauten der Außen- und Innenwand sowie denen von Fußboden und Decke. In der thermischen Modellierung werden nur jene Bauteilschichten berücksichtigt, die einen signifikanten Einfluss auf das thermische Verhalten des Bauteils nehmen.

¹⁸ Dem KfW-Effizienzhausstandard 55 kommt nach dem aktuellen Referentenentwurf des Gesetzes zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (GEG) vom 23. Januar 2017 eine Vorbildfunktion zu für das ab 2020 für alle Neubauten vorgeschriebene Anforderungsniveau des sogenannten Niedrigstenergiestandards (BMWi (2016)). Um die Anforderungswerte besser einordnen zu können, sind diese in Anhang D dieser Arbeit in weiteren Anforderungen sowie den im thermischen Modell verwendeten Werten gegenübergestellt.



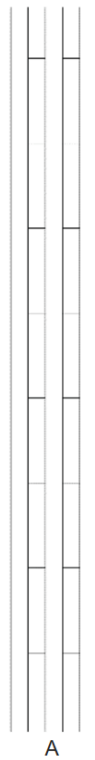
Fußboden / Decke

- A: Fliesenboden | 10 mm
- B: Zementestrich | 50 mm
- C: Estrichfolie | -
- D: Trittschalldämmung | 30 mm
- E: Schüttung | 80 mm
- F: Rieselschutz | -
- G: Brettsperrholz | 100 mm



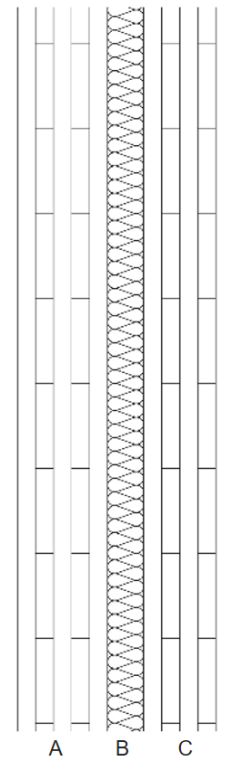
Außenwand

- A: Lattung | $R_{se} = R_{si}$
- B: Hinterlüftungsebene | $R_{se} = R_{si}$
- C: Winddichte Ebene | -
- D: Holzfaserdämmung | 160 mm
- E: Brettsperrholz | 100 mm



Innenwand

- A: Brettsperrholz | 100 mm



Zonentrennwand

- A: Brettsperrholz | 100 mm
- B: Mineraldämmung | 40 mm
- C: Brettsperrholz | 100 mm

Abbildung 6.13: Katalog der Bauteilaufbauten für die Simulation des Doppelbüros

Die in der thermischen Simulation nicht berücksichtigten Bauteilschichten sind beispielsweise Folien und Abdichtungsebenen. Die Hinterlüftungsebene des Außenwandbauteils wird mit einem angepassten konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt.

Die nach Süd ausgerichtete Fassade des Doppelbüros ist zu 70 % transparent. Dies entspricht einem grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil von $f_{WG} = 34\%$. Bei der Verglasung handelt es sich um eine Dreischeiben-Sonnenschutzverglasung (3-S-SSV). Diese weist einen Gesamtenergiedurchlassgrad g von 0,402 und einen U -Wert von $0,59 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf. Beide genannten Werte dienen lediglich als Referenz für den Leser. In der dynamischen Simulation wird der Wärmedurchgang instationär mit den hinterlegten einstrahlungsrichtungsabhängigen Werten: T_{Sol} , $R_{f\text{-sol}}$ und T_{vis} sowie dem detaillierten Schichtenaufbau des Fensters gerechnet.

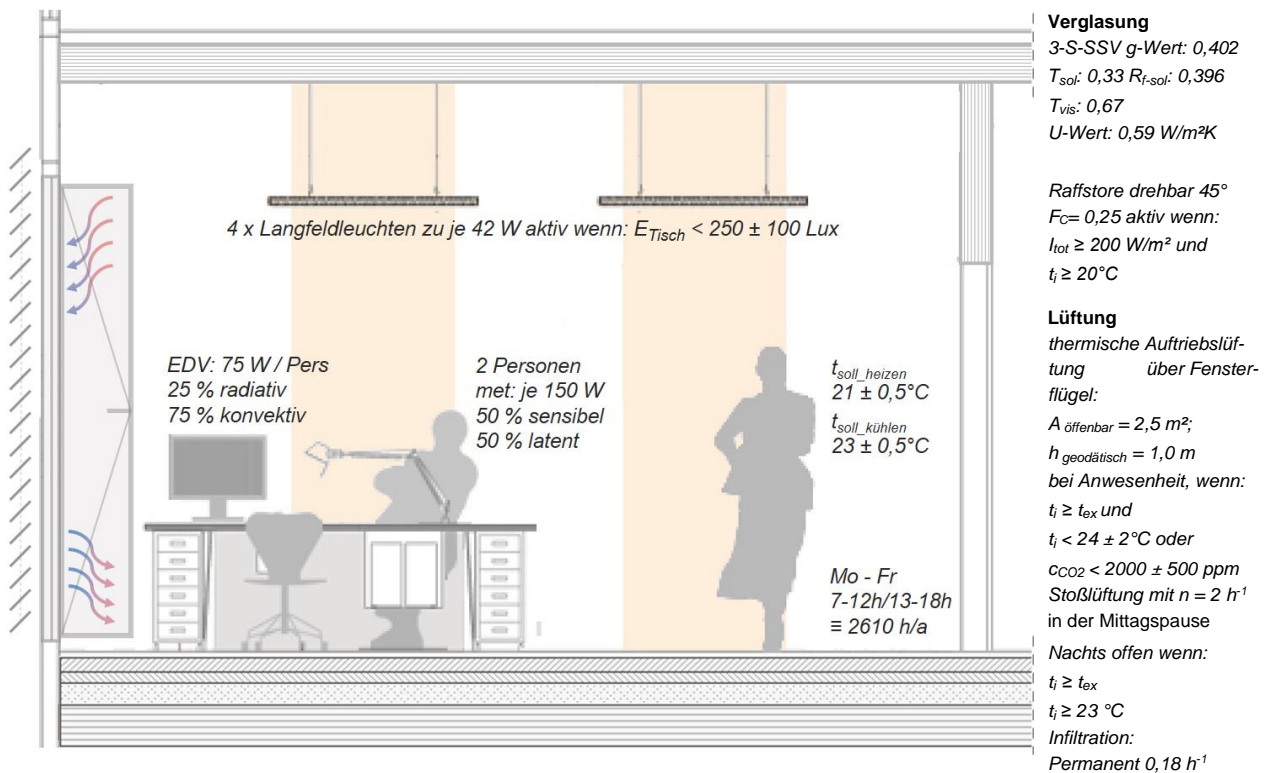


Abbildung 6.14: Raumklimatische Randbedingungen zur Nutzermodellierung

Zur Begrenzung der solaren Einträge ist ein außenliegender verstellbarer Raffstore-Sonnenschutz modelliert. Dieser wird bei einer Gesamtstrahlung auf die Außenfassade ab 200 W/m^2 automatisch aktiviert, wenn zeitgleich die simulierte Innenraumluft wärmer als 20°C ist. Die eindringende Solarstrahlung wird dann entsprechend des F_c -Wertes auf 25 % des aktuellen Ausgangswertes reduziert. Neben den solaren Einträgen tragen nutzungsbedingte thermische Lasten zur Erwärmung des Innenraumklimas bei. Dazu zählen, wie oben angegeben, die anwesenden Personen, die künstliche Beleuchtung sowie die EDV. Die menschliche Wärmeabgabe und die der EDV sind direkt an den Belegungszeitplan geknüpft. Es wird angenommen, dass das Büro von montags bis freitags zwischen 07:00 Uhr und 12:00 Uhr sowie zwischen 13:00 Uhr und 18:00 Uhr belegt ist.

In dem modellierten Doppelbüro soll, mit Blick auf die nachhaltige Entwicklung des zukünftigen Gebäudebestands, auf eine mechanische Lüftungsanlage verzichtet werden. Die Lüftung des Büros wird ausschließlich durch eine freie Lüftung mit den beiden offenbaren Fensterflügeln durch die Nutzer gewährleistet.

Die Modellierung der Mensch-Gebäude-Interaktion berücksichtigt während der Anwesenheit der Nutzer eine Temperatur- und CO₂-Konzentrationsmotivierte Öffnung des Fensterflügels, eine Stoßlüftung mit $n = 2 \text{ h}^{-1}$ in der Mittagspause, sowie eine nächtliche Öffnung des Fensters bei den oben angegebenen Temperaturbedingungen. Die Berechnung der Luftwechselrate erfolgt in Abhängigkeit der geöffneten Fensterfläche, der Geometrie der Fensteröffnung, der thermisch wirksamen, aktuellen Temperaturdifferenz zwischen Innenraum- und Außenluft. Ferner ist ein vom Nutzer unabhängiger permanenter Infiltrationsluftwechsel, berechnet gem. DIN V 18599-2, von $n = 0,18 \text{ h}^{-1}$, angesetzt.

6.4.2 Standortklimadaten

In der thermischen Gebäudesimulation werden Außenklimadaten für ein prognostiziertes mittleres Jahr 2035 im Format: Testreferenzjahr (TRY) verwendet (BBR 2014). Die TRY-Daten werden vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BSR) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) veröffentlicht und prognostizieren für bundesweit 15 TRY-Klimaregionen das Klima für den Zeitraum zwischen 2021 bis 2050 unter Berücksichtigung der Meereshöhe sowie weiteren Einflüssen, wie der thermischen Auswirkung einer eng bebauten Innenstadtumgebung. Für die Stadt München gelten die Daten der TRY-Klimaregion 13. Diese basieren auf Wettermessungen der Stadt Mühldorf am Inn. Nach Korrektur der Meereshöhe sowie der innerstädtischen Lage und der Stadtgröße können die Daten für das gesamte Schwäbisch-fränkische Stufenland sowie für das Alpenvorland angewendet werden.

6.4.3 Ergebnisse der Raumklimasimulation

Für die Betrachtung der Leistungsfähigkeit der thermisch aktivierten Massivholzelemente auf Raumebene wird die simulierte operative Raumtemperatur als Bewertungskriterium herangezogen. Die operative Temperatur ist unmittelbar durch langwellige Strahlung und mittelbar durch Konvektion von der thermischen Leistung der aktiven Elemente beeinflusst. Der Nutzer des Raumes beeinflusst die operative Temperatur mittelbar durch die Fensterlüftung, die eigene Wärmeabgabe und durch die Vorgabe der Solltemperaturen um Heiz- und im Kühlbetrieb.

Die gewählte Darstellungsform entspricht der in Tabelle 2-7 empfohlenen Bewertung der thermischen Behaglichkeit Gebäuden mittels adaptiven Verfahrens. Dieser Ansatz ist im nationalen Anhang der DIN EN 15251: 2012-12 definiert und berücksichtigt die außenlufttemperaturabhängige Akzeptanz des Nutzers gegenüber warmen und kühlen Raumluftzuständen. Dabei wird eine Adaption des Außenklimas angenommen, aufgrund dessen der Nutzer eines Gebäudes eine leicht erhöhte operative Innenraumtemperatur bei hohen Außenlufttemperaturen als weniger unbehaglich empfindet. Für das Referenzszenario ‚frei belüftetes Doppelbüro‘ ist in Tabelle 6-4 der einschlägige Abschnitt aus Tabelle 2-7 wiedergegeben.

Tabelle 6-4: Akzeptanzbereich für die operative Innenraumtemperatur in frei belüfteten Bürogebäuden in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur. (Auszug aus Tabelle 2-7)

DIN EN 15251: nationaler Anhang	Gültigkeit: Sommer/ Winter	Adaptives Verfahren $22\text{ °C} \pm 2\text{K}$ für $t_{\text{out}} < 16\text{ °C}$ $18\text{ °C} + 0,25 \cdot t_{\text{out}}$ für $16\text{ °C} < t_{\text{out}} < 32\text{ °C}$ $26\text{ °C} \pm 2\text{K}$ für $t_{\text{out}} > 32\text{ °C}$
------------------------------------	----------------------------------	--

Für eine ganzjährige Leistungsbetrachtung der thermisch aktivierten Massivholzelemente sind die Grenzen des Komfortbandes in den folgenden beiden Ergebnisdarstellungen eingezeichnet. Diese ermöglichen eine orientierende Bewertung der simulierten operativen Temperatur.

In Abbildung 6.15 ist die operative Temperatur für das gesamte Jahr aufgetragen. Jeder Punkt entspricht einer der 8760 Stunden.

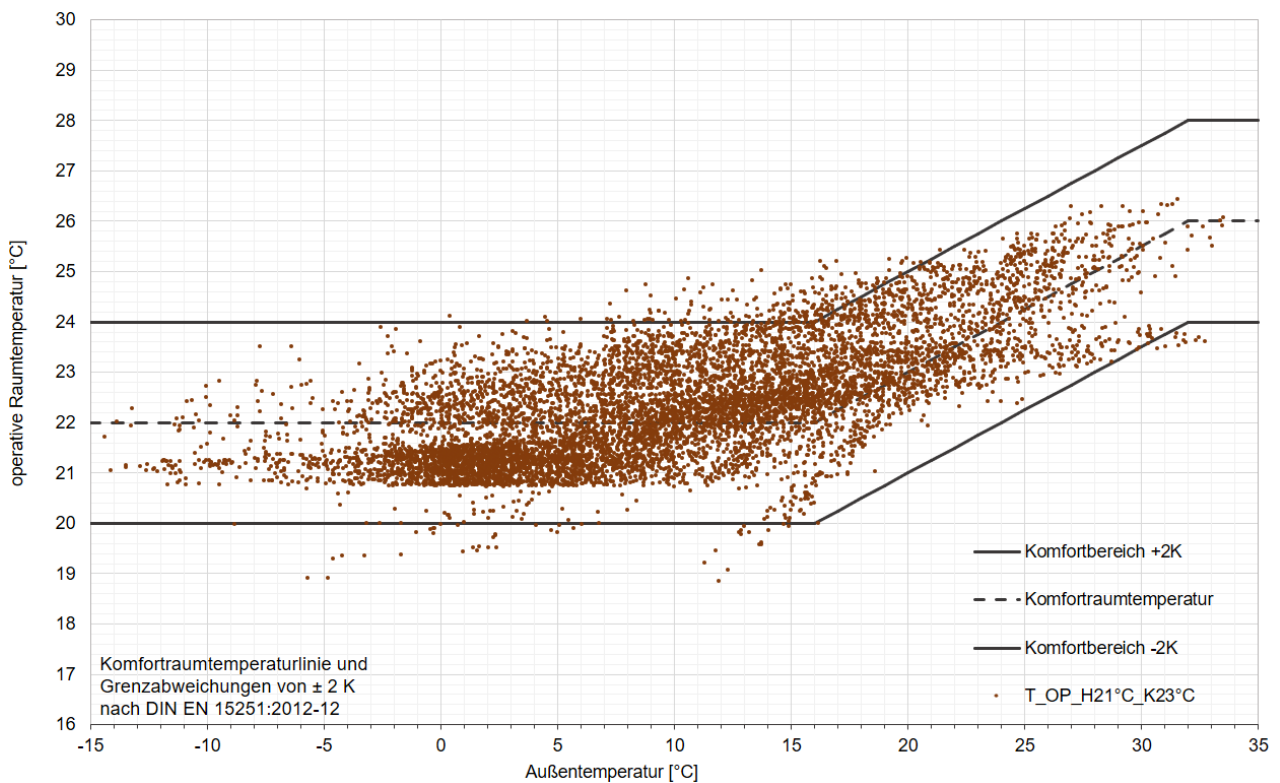


Abbildung 6.15: Punktwolkendiagramm zur Darstellung der ganzjährigen operativen Raumtemperaturzustände in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur (8760 Punkte)

Die Abbildung zeigt, dass die Stundenwerte der operativen Raumtemperatur annähernd vollständig in dem definierten Komfortbereich liegen. Auf der unteren Seite der Punktwolke ist ein waagerechtes Plateau bei ca. $20,5\text{ °C}$ zu erkennen. Dieses entspricht der Einschaltgrenze der zweipunktgeführten Heizungsregelung. Diese liegt aufgrund der Hysterese $0,5\text{ K}$ unter der eingestellten Solltemperatur von 21 °C . Es fällt auf, dass einige Werte unterhalb des $20,5\text{ °C}$ -Niveaus und sogar unterhalb des Komfortbandes liegen. Diese ‚Ausreißer‘ lassen sich im Bereich geringer Außenlufttemperatur durch die mittägliche Stoßlüftung und bei höheren Außenlufttemperaturen durch die Nachtlüftung erklären.

Beide Ereignisse finden außerhalb der Anwesenheitszeit statt und können daher aus raumklimatischer Perspektive als unkritisch bewertet werden. Um diese These zu belegen werden in der Abbildung 6.16 die Werte der operativen Raumtemperatur nur während der definierten Anwesenheitszeit eingeblendet. Mit den ausgeblendeten Werten der Nichtanwesenheitszeit verschwinden auch die Ausreißer unterhalb des Komfortbandes.

Hiernach kann festgestellt werden, dass die gewählte Modulzahl und die spezifische Heizleistung jedes thermisch aktivierten Massivholzelements für das betrachtete Referenzszenario im Heizbetrieb ausreichend sind.

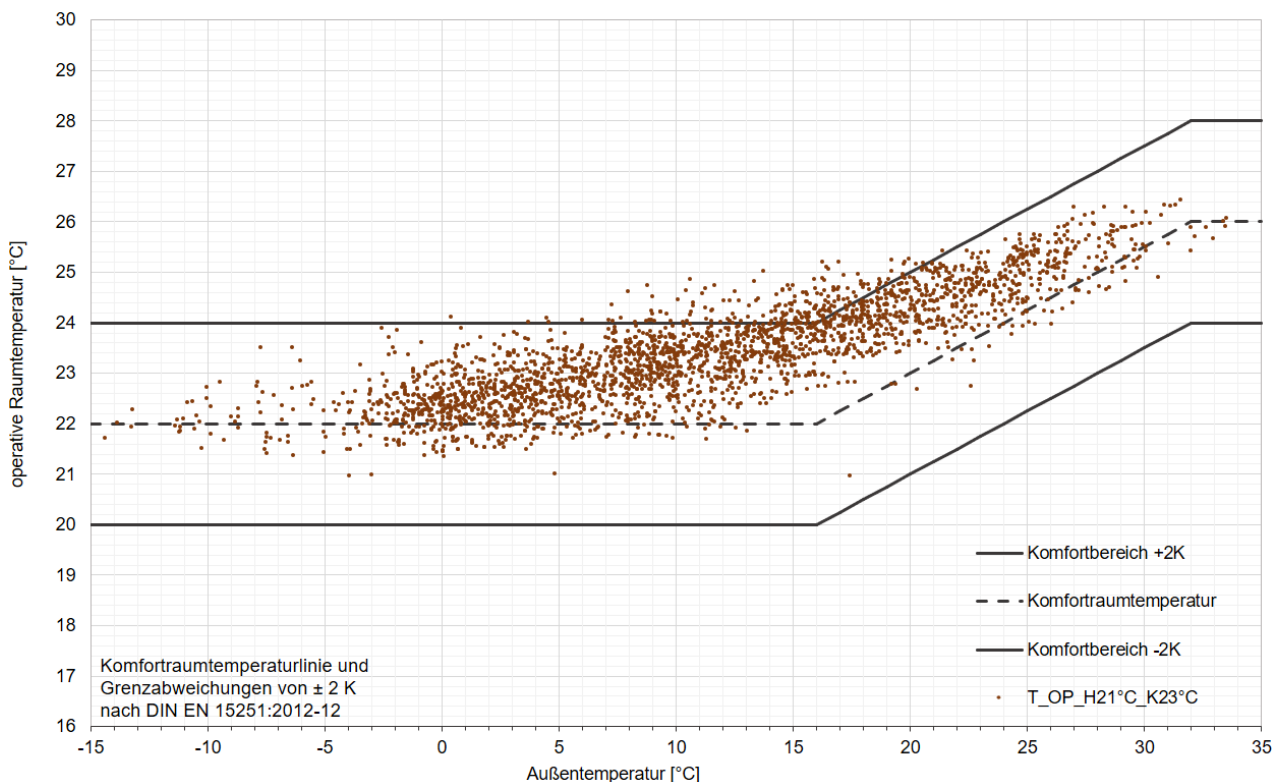


Abbildung 6.16: Punktwolkendiagramm zur Darstellung der ganzjährigen operativen Raumtemperaturzustände in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur während der Anwesenheit

Die obere Grenze des Komfortbandes wird während der Anwesenheit in 184 Stunden von insgesamt 2610 Anwesenheitsstunden überschritten. Das entspricht einer relativen Häufigkeit der Überschreitung von 7,1 % der Anwesenheitszeit. Der arithmetische Mittelwert der Überschreitung beträgt 0,28 K. Die maximale Überschreitung des Komfortbandes beträgt 1,15 K.

Die Ergebnisse der Raumklimasimulation zeigen, dass sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb eine angemessene Leistung von den thermisch aktivierten Massivholzelementen an das untersuchte Doppelbüro abgeben wird. Zwar sind die Komfortbedingungen in Anlehnung an DIN EN 15251 an der oberen Temperaturgrenze nicht vollständig eingehalten. Allerdings wird sowohl die Häufigkeit als auch das Maß der Überschreitung durch die operative Temperatur als akzeptabel gewertet.

Ergänzend sollen die simulierten Bedarfe an Heiz- und Kühlenergie für das Referenzszenario erwähnt werden. Der Heizwärmebedarf auf Nutzenergieebene beläuft sich auf 17,97 kWh/m²a, der Nutzenergiebedarf für die Kühlung beträgt 22,93 kWh/m²a.

6.5 Optimierungsvorschlag für den Bau weiterer Prototypen

Abschließend wird ein Vorschlag unterbreitet für die Konstruktion eines weiterentwickelten prototypischen Probekörpers Prototyp C für die Untersuchungen im Nachgang dieser Arbeit. Zwei wichtige Erkenntnisse zur konstruktiven Optimierung der thermisch aktivierten Massivholzelemente betreffen das aerodynamisch günstige Kanalarrangement und die Wärmeübertragung von den thermisch aktivierten Kanälen an die raumseitige Oberfläche.

Das Arrangement der Kanäle, respektive die Anordnung in der Fläche, sollte der in Abbildung 4.43 dargestellten Geometrie entsprechen. Die Untersuchung in Abschnitt 4.3.4 zeigt, dass durch die aufgezeigte aerodynamisch optimierte Kanalgeometrie die Druckdifferenz und damit die notwendige elektrische Hilfsenergie zum Betrieb des Systemluftkreislaufs um 38,2 % auf bis zu 50,6 % reduziert werden.

Für die Optimierung der Wärmeübertragungsleistung wird empfohlen, wie in Abbildung 6.17 illustriert, die überdeckende Holzschicht über den luftführenden Kanälen zu reduzieren.

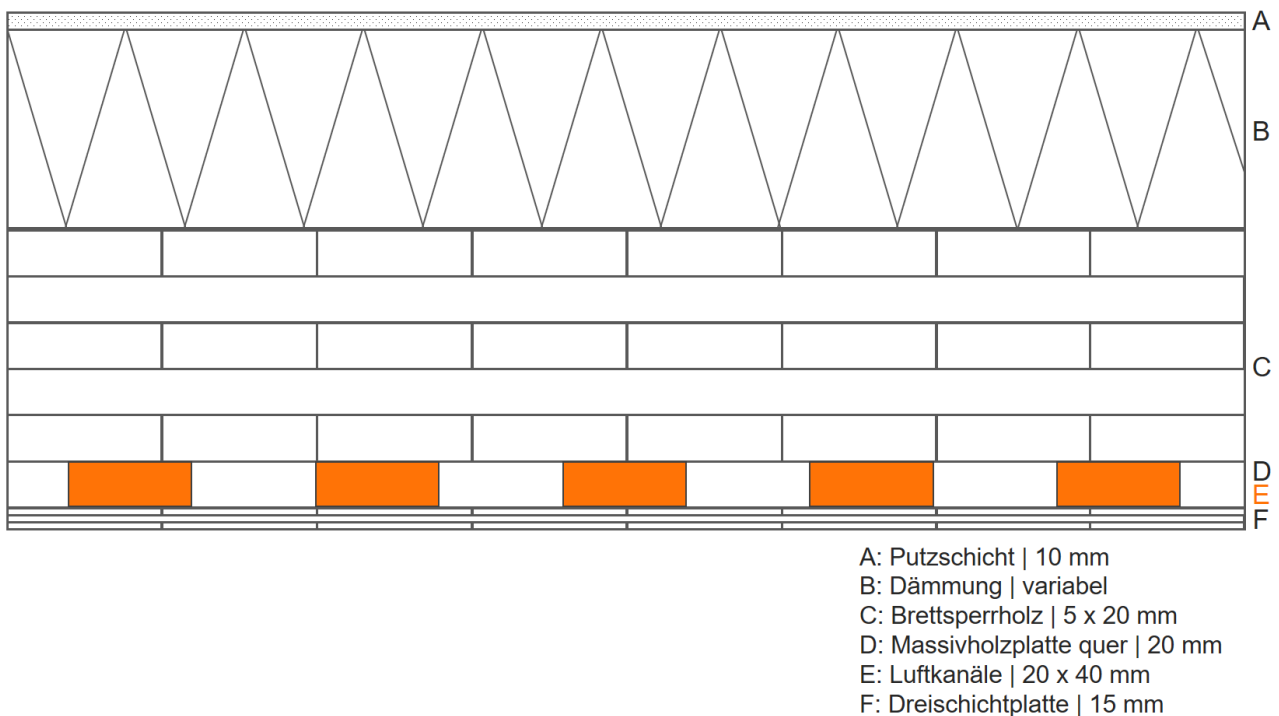


Abbildung 6.17: Vorschlag für den Schichtenaufbau von Prototyp C am Beispiel eines Außenwandbauteils (die Dämmstärke ist nicht maßstäblich)

Im Vergleich der beiden untersuchten Prototypen hat die Reduzierung der Holzüberdeckung von 40 mm bei Prototyp A auf 20 mm bei Prototyp B eine Steigerung der thermischen Leistung von 44 % sowie eine Halbierung der Einschaltzeitverzögerung erwirkt. Eine weitere Reduzierung der überdeckenden Holzschicht erfordert konstruktive Maßnahmen um, auch bei Quell- und Schwindverformungen eine Luftdichtheit zwischen der Systemluft und der Raumluft zu erhalten. Dies könnte, wie oben gezeigt, durch die Verwendung einer Dreischichtplatte geschehen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Ergebniszusammenfassung und Diskussion

Die Umsetzbarkeit von thermisch aktivierten Massivholzelementen als Flächenheizungs- und Kühlungssystem wird in der vorliegenden Arbeit am Beispiel von luftführenden Brettsperrholz-Wandelementen nachgewiesen. Durch das bauteilintegrierte System wird es möglich, ganzjährig behagliche Raumklimazustände herzustellen, auch wenn die raumseitigen Oberflächen in Sichtholzqualität ausgeführt werden sollen. Der Wärmeüberträger Wasser wird aufgrund des hohen Schadenrisikos bei der Beschädigung von Leitungen im Brettsperrholzelement, aus Gründen der Herstellbarkeit und mit Blick auf die materialreine Trennbarkeit am Lebenszyklusende im Rahmen dieser Arbeit nicht eingesetzt.

Die Konfiguration als Wandelement erweist sich als vorteilhaft, da mit diesem sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb thermisch behagliche Zustände erreicht werden. Neben der Wärmephysiologie ist die konvektive Wärmeübertragung am Wandelement im Vergleich zu Fußboden und Decke in beiden Betriebsmodi positiv zu bewerten. Ein weiterer Vorteil der Konfiguration als Wandelement offenbart sich bei der für das System notwendigen Standardisierung der Elementgröße. Diese lässt sich bei Wandelementen konsequenter umsetzen als bei Boden- bzw. Deckenelementen.

Bei der Herstellung der Elemente kann weitgehend auf bestehende Produktionsanlagen zurückgegriffen werden. Beim Bau der ersten zwei Prototypen wurden die luftführenden Kanäle während des regulären Brettsperrholzherstellungsprozesses in das Innere der Elemente gefräst. Der hinzukommende Fräsvorgang dauerte ca. 90 Minuten. Verfahrenstechnischer Optimierungsbedarf besteht beim selektiven Aufbringen des Klebers sowie beim Fräsen der integrierten Kanäle. Durch die Wahl von geeigneten Zerspanungswerkzeugen kann der Fräsvorgang stark beschleunigt werden. Für die Produktion von thermisch aktivierten Massivholzelementen sollten in allen Schichten schmalseitenverklebte Brettlagen verwendet werden, um die Luftdichtheit der Elemente und die mechanische Festigkeit beim Fräsen zu erhöhen. Für den Bau weiterer Prototypen werden in der Arbeit optimierte Konstruktionsvorschläge unterbreitet.

Die Betrachtung des Systems auf Raumebene zeigt, dass für Wandelemente ein sogenanntes doppelharfenförmiges Kanalarrangement vorteilhaft ist. Dieses ermöglicht die Erschließbarkeit der Systemanschlüsse in der Versorgungsebene des Fußbodenaufbaus oder der Decke. Ein weiterer wichtiger Vorteil dieser Aufteilung sind die nahezu aerodynamisch abgeglichenen Druckdifferenzen zwischen den Kanälen, da sämtliche Strömungswege ungefähr dieselbe Länge aufweisen.

Die maximal erreichbare Heiz- und Kühlleistung der getesteten Prototypen ist abhängig von der Vorlauftemperatur sowie von der Lagetiefe der Luftkanäle. Sie wird begrenzt von der sich einstellenden Holzfeuchte. Versuche und Simulationen zeigen, dass mit thermisch aktivierten Massivholzelementen aus Fichtenholz eine Heizleistung von 47 Watt je m²-Elementfläche bei Raumluftkonditionen von 20 °C und 50 % r.F. ohne Beeinträchtigung der Brettsperrholzelemente dauerhaft möglich ist. Am Prototyp B wird diese bei einer Heizmittelübertemperatur von 23,5 K erreicht.

Bei extrem trockenem Umgebungsklima mit relativen Luftfeuchten unter 30 % sollte die dauerhaft zulässige Heizleistung reduziert werden, um geringe Holzfeuchten und dadurch auftretende Schwindrisse an der Elementoberfläche zu vermeiden. Die zulässige flächenspezifische Kühlleistung wird zusätzlich durch das Taupunktkriterium bestimmt. Dieses wird regelungstechnisch umgesetzt und verhindert kurzfristig auftretende Systemtemperaturen unterhalb des Taupunktes der Raumluft. Bei normaler Raumluftkondition von 20 °C und 50 % r.F. beträgt die dauerhaft zulässige spezifische Kühlleistung 24 W/m², um Werte der Holzfeuchte $u > 20$ % zu vermeiden. Bei Prototyp B wird diese bei einer Kühlmitteluntertemperatur von -12 K erreicht.

Das entwickelte thermische Simulationsmodell wird durch einen Abgleich mit den Labormessdaten validiert. Es zeigt sowohl im stationären Betrieb als auch bei instationären Betriebswechseln zufriedenstellende Übereinstimmung mit den im Labor gemessenen Leistungsdaten. Das Modell wird verwendet, um die thermische Leistungsfähigkeit der prototypischen Elemente zu berechnen. Im Rahmen einer Leistungsbetrachtung auf Bauteilebene wird das System zwei etablierten Flächenheiz- und Kühlsystemen gegenübergestellt. Der direkte Vergleich zeigt, dass mit Prototyp A ca. 45 % und mit Prototyp B ca. 65 % der thermischen Leistung der Referenzsysteme erreicht wird.

Auf Raumebene wird das System mithilfe des validierten Modells in einem virtuellen, repräsentativen Anwendungsszenario getestet. Dabei handelt es sich um ein natürlich belüftetes Doppelbüro mit südorientierter, zu 70 % verglaster Fensterfassade und außenliegendem Sonnenschutz. Die Simulation der operativen Raumtemperatur zeigt, dass für das Büro der Einbau von vier thermisch aktivierten Massivholzelementen ausreichend ist, um ganzjährig behagliche Raumklimabedingungen zu gewährleisten.

Für die Bemessung des Systems in realen Einsatzszenarien werden zwei unterschiedliche, in der Praxis etablierte Auslegungswerkzeuge erarbeitet. Diese ermöglichen erstens eine stationäre Auslegung nach DIN EN 1264 und zweitens eine instationäre Auslegung mittels thermischer Gebäudesimulation nach VDI 2078.

7.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere in der strömungstechnischen Optimierung des Kanalsystems und der darauf abgestimmten Entwicklung einer standardisierten Luftkonditionierungseinheit für die Systemluft.

Für eine hohe thermische Leistung des Systems und geringe Temperaturüberhöhungen der Systemluft sowie für eine geringe Einschaltverzögerung wird empfohlen, die raumseitige Deckschicht über den thermisch aktivierten Kanälen möglichst dünn zu konstruieren. Als raumseitige Deckschicht könnte hierfür eine ca. 15 mm starke Dreischichtplatte, optional aus derselben Holzart, verwendet werden.

Beim Einsatz der thermisch aktivierten Massivholzelemente in stark wechselfeuchten Umgebungen sollte die temperaturabhängige Sorption und Desorption von Wasserdampf an der Holzoberfläche weitergehend untersucht werden. Somit wäre es u. U. möglich, die aufgrund der Materialfeuchteentwicklung limitierte thermische Leistung der Elemente zu steigern. Die standardmäßige Integration von Feuchteberechnungsmodulen in das numerisch-thermische Auslegungsmodell wird aufgrund der großen Ungenauigkeit und des Aufwandes der Feuchteberechnung für Standardanwendungen bis auf weiteres nicht empfohlen.

Der exotherme bzw. endotherme Effekt der umgesetzten latenten Enthalpie bei der Sorption und bei der Desorption von Wasserdampf an der Holzoberfläche gewinnt an Bedeutung bei häufig stattfindenden Betriebswechseln zwischen Heizen und Kühlen und in stark wechselfeuchten Umgebungen. Es ist denkbar, einen dies berücksichtigenden Latent-Enthalpie-Term in das thermische Berechnungsmodell im Rahmen der Weiterentwicklung der thermisch aktivierten Massivholzelemente zu integrieren.

Zur Fortentwicklung der thermisch aktivierten Massivholzelemente in Richtung einer baupraktischen Anwendbarkeit sind Detaillösungen für konkrete Einbausituationen und des Anschlusses an die Versorgungsstruktur des Gebäudes zu erarbeiten. Auf der Gebäudeebene sind diese Details entsprechend den Schutzziele des Brand- Schall- Wärme- und Feuchteschutzes sowie der Statik zu entwickeln. Erste Überlegungen und Ansätze zur Erfüllung der oben genannten Schutzziele sind in (Tsoupras 2018) dokumentiert.

Durch die Weiterentwicklung der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Technologie der thermisch aktivierten Massivholzelemente könnte es zukünftig möglich sein, die Ausbauphase von Holzgebäuden zu beschleunigen, durch ein hohes Maß an werkseitiger Vorfertigung die Qualität der Ausführung zu verbessern und, nicht zuletzt, das Raumklima und die Behaglichkeit der Bewohner in Holzgebäuden ganzjährig zu steigern.

8 Literaturverzeichnis

- Achtziger, Joachim.; Cammerer, J. (1984): Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen. Forschungsvorhaben Nr. BI5-800183-4. Stuttgart: IRB-Verlag (Bau- und Wohnforschung).
- Adnot, Jérôme; Riviere, Philippe; Marchio, Dominique; Waide, Paul: Energy_Efficiency_and_Certification_of_Central_Air_Conditioners. Hg. v. Armines. ECOLES PARTENAIRES D'ARMINES. Saint Michel, France. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/274048785_Energy_Efficiency_and_Certification_of_Central_Air_Conditioners, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH (2018): Produktdaten zum Almemo-Messsystem. Hg. v. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH. Holzkirchen. Online verfügbar unter <https://www.ahlborn.com/>, zuletzt aktualisiert am 2019, zuletzt geprüft am 01.03.2019.
- Albers, Karl-Josef (Hg.) (2017): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2017/2018. 78. Auflage. München: DIV Deutscher Industrieverlag GmbH (einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte). Online verfügbar unter [http://scifo.de/nc/detail/media/show/Product/?tx_acmmam_acmmam\[ean\]=9783835672857](http://scifo.de/nc/detail/media/show/Product/?tx_acmmam_acmmam[ean]=9783835672857).
- ANSYS (2019): ANSYS CFX. ANSYS Inc. Online verfügbar unter <https://www.ansys.com/de-de/products/fluids/ansys-cfx>, zuletzt geprüft am 04.03.2019.
- Armbruster, Christian; Böhm, Albert; Eder, Andreas; Haslehner, Benjamin; Genböck, Martin; Gruber, Stefan (2011): Bauen mit Holz in Oberösterreich. In: Pro:Holz Oberösterreich 2011. Online verfügbar unter <http://www.proholz-ooe.at/fileadmin/proholz.ooe/media/BMHOOE2.pdf>, zuletzt geprüft am 18.08.2018.
- ASR A3.5, 2010-06: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Technische Regeln für Arbeitsstätten Raumtemperatur.
- Bader, H. (2005): Etude visant a ameliorer les proprietes des panneaux en bois massif multicouches en optimisant leur constitution. Travail de Diplôme. Etude visant a ameliorer les proprietes des panneaux en bois massif multicouches en, Zürich. Institute for Building Materials.
- Baehr, Hans Dieter; Kabelac, Stephan (2016): Thermodynamik Grundlagen und technische Anwendungen. 16., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49568-1>.
- Baehr, Hans Dieter; Stephan, Karl (2013): Wärme- und Stoffübertragung. 8., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-36558-4>.

- Bastian, Zeno; Arnautu, Dragos; Schnieders, Jürgen; Kaufmann, Berthold; Mikeska, Tomas; Peper, Søren (2018): Leitfaden Gebäudezertifizierung. Hg. v. Passivhaus Institut. Darmstadt, zuletzt geprüft am 18.08.2018.
- Bauer, Wilhelm; Jurecic, Mitja; Rief, Stefan; Stolze, Dennis (Hg.) (2018): Office Analytics. Erfolgsfaktoren für die Gestaltung einer typbasierten Arbeitswelt. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation; Fraunhofer IRB-Verlag. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Baumgartner, Tim (2018): Thermisch aktivierte Massivholzelemente - Analyse und Systemvergleich mittels thermischer Gebäudesimulation. Master´s Thesis. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- BBR (2014): Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Unter Mitarbeit von Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH und Deutschen Wetterdienst (DWD). Hg. v. Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung. Offenbach, zuletzt geprüft am 15.08.2018.
- BBR (2017): Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Unter Mitarbeit von Deutschen Wetterdienst (DWD). Offenbach, zuletzt geprüft am 15.08.2015.
- Benzinger, Theodor Hannes (1979): The physiological basis for thermal comfort. In: Valbjorn, O und Fanger, P.O (Hg.): Indoor Climate S. 441–476.; Danish Building Research Institute, Kopenhagen,
- Binderholz GmbH (2019): binderholz brettsperrholz BBS. Hg. v. Binderholz GmbH. Binderholz GmbH. Fügen, Zillertal. Online verfügbar unter https://www.binderholz.com/fileadmin/PDF/Services_Kontakt/Videos_Download/Prospekte/BBS_D_WEB.pdf, zuletzt aktualisiert am 2019, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Blaß, Joachim; Görlacher, Rainer; Steck, Günter (1995): Holzbauwerke. Bemessung und Baustoffe: nach Eurocode 5. Düsseldorf: Fachverlag Holz (Informationsdienst Holz).
- BMWi (2016): Gesetzentwurf der Bundesregierung: Entwurf eines Gesetzes zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2016). Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, zuletzt geprüft am 17.08.2018.
- Bosy, Bruno (o.J.): Hypokaustenheizung. Hg. v. Bruno Bosy. Online verfügbar unter <http://www.bosy-online.de/hypokaustenheizung.htm>, zuletzt geprüft am 17.10.2017.
- Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz (24.10.2015): Verordnung über energie sparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV). EnEV, vom 2016. Fundstelle: <http://www.gesetze-im-internet.de/>. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/EnEV.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2019.

- Bungartz, Hans-Joachim (o.J.): Einführung in die mathematische Modellierung. Online verfügbar unter https://www5.in.tum.de/lehre/vorlesungen/mod_sim/SS05/ModSim_01.pdf, zuletzt geprüft am 03.11.2017.
- Cammerer, Walter. F. (Hg.) (1970): Wärmeleitfähigkeit und Diffusionswiderstand von Holzwerkstoffen. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-1463-1.pdf>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Carstensen, Lasse (2016): Untersuchung der Auswirkungen von jahreszeitlich bedingten Feuchte-schwankungen auf die Wärmeleitfähigkeit von Brettsperrholz. Master's Thesis. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- DKD-R 5-1, Physikalisch-Technische Bundesanstalt - Deutscher Kalibrierdienst 2003-10: Kalibrierung von Widerstandsthermometern. Online verfügbar unter <https://www.ptb.de/cms/de/metrologische-dienstleistungen/dkd.html>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- DIN 52612-2, 1984-06: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät Weiterbehandlung der Meßwerte für die Anwendung im Bauwesen.
- DIN EN 12667, 2001-05: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät.
- DIN EN ISO 7726, 2002-04: Umgebungsklima Instrumente zur Messung physikalischer Größen.
- DIN EN 13183-1, 2002-06: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren.
- DIN EN 13183-2, 2002-06: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren.
- DIN EN 13183-2:2002-07, Berichtigung_2003-12.
- DIN EN 13183-3, 2005-06: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 3: Schätzung durch kapazitives Messverfahren.
- DIN EN ISO 7730, 2006-05: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit.
- DIN EN 1264-5, 2009-01: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung – Teil 5: Heiz- und Kühlflächen in Fußböden, Decken und Wänden - Bestimmung der Wärmeleistung und der Kühlleistung.

- DIN EN 15377-1, 2009-02: Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von eingebetteten Flächenheiz- und Kühlsystemen mit Wasser aw als Arbeitsmedium – Teil 1: Bestimmung der Auslegungs- Heiz- bzw. Kühlleistung dra.
- DIN EN 1264-3, 2009-11: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung – Teil 3: Auslegung.
- DIN EN 1264-4, 2009-11: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung – Teil 4: Installation.
- DIN EN ISO 10456, 2010-05: Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte.
- DIN EN 1264-1, 2011-09: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung – Teil 1: Definitionen und Symbole.
- DIN EN 15251, 2012-12: Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- DIN 4108-2, 2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- DIN EN 1264-2, 2013-03: Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung – Teil 2: Fußbodenheizung: Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden.
- DIN EN ISO 11855-5, 2015-11: Umweltgerechte Gebäudeplanung – Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme – Teil 5: Installation.
- DIN EN ISO 18134-1, 2015-12: Biogene Festbrennstoffe – Bestimmung des Wassergehaltes – Ofentrocknung – Teil 1: Gesamtgehalt an Wasser Referenzverfahren –.
- DIN EN ISO 11855-1, 2016-11: Umweltgerechte Gebäudeplanung – Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme – Teil 1: Begriffe, Symbole und Komfortkriterien.
- DIN EN ISO 11855-2, 2016-11: Umweltgerechte Gebäudeplanung – Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme – Teil 2: Bestimmung der Auslegungs-Heiz- bzw. Kühlleistung.
- DIN EN ISO 11855-3, 2016-11: Umweltgerechte Gebäudeplanung – Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme – Teil 3: Planung und Auslegung.

- DIN EN ISO 11855-4, 2016-11: Umweltgerechte Gebäudeplanung – Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme – Teil 4: Auslegung und Berechnung der dynamischen Wärme- und Kühlleistung für thermoaktive Bauteilsysteme (TABS).
- DIN V 18599-12, 2017-04: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 12: Tabellenverfahren für Wohngebäude.
- DIN EN 12831-1, 2017-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil 1: Raumheizlast.
- DIN EN 12831-3, 2017-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil 3: Trinkwassererwärmungsanlagen, Heizlast und Bedarfsbestimmung.
- DIN V 18599-1, 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger.
- DIN V 18599-10, 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten.
- DIN V 18599-11, 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 11: Gebäudeautomation.
- DIN V 18599-2, 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.
- DIN V 18599-3, 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 3: Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung.
- DIN V 18599-4, 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung.
- DIN V 18599-5, 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen.
- DIN V 18599-6, 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung –

Teil 6: Endenergiebedarf von Lüftungsanlagen, Luftheizungsanlagen und Kühlsystemen für den Wohnungsbau.

DIN V 18599-7, 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 7: Endenergiebedarf von Raumluftechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau.

DIN V 18599-8, 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen.

DIN V 18599-9, 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 9: End- und Primärenergiebedarf von stromproduzierenden Anlagen.

DIN EN 16351, 2018-12: Holzbauwerke – Brettsperrholz – Anforderungen;

Dolder, Markus (2019): Mollier h, x-Diagramm für feuchte Luft. Hg. v. Ingenieurbüro Dolder. Ingenieurbüro Dolder. Luzern. Online verfügbar unter https://www.dolder-ing.ch/wissen/Lueftung-Klima/h-x-diagramm/Mollier_h-x-diagramm_Bild.htm, zuletzt aktualisiert am 2019, zuletzt geprüft am 20.02.2019.

Duncker, Fabian (2017): Vergleich ausgewählter Behaglichkeitsmodelle zur unmittelbaren Bewertung des Innenraumklimas und deren messtechnischer Implementierung in ein mobiles und autark funktionierendes open-source Messsystem. Master’s Thesis. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Emmel, Anne-Catherine (2017): Untersuchung ausgewählter Anwendungsszenarien thermisch aktivierter Massivholzelemente. Master’s Thesis. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Engelund, Tang; Garbrecht Thygesen, Lisbeth; Svensson, Staffan; Hill, Callum A. S. (2012): A critical discussion of the physics of wood–water interactions: Springer (Volume 47). Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-012-0514-7>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.

Ertl, Alexander (2019): Strömungsoptimierung von Kanalsystemen thermisch aktivierter Massivholzelemente. Master’s Thesis. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Ertl, Dominik (2017): Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit unterschiedlicher Bauweisen auf die thermische Behaglichkeit und den Heizwärmebedarf von Gebäuden. Master’s Thesis. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

- Fischer, Wolfram (Hg.) (1992): Die Geschichte der Stromversorgung. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Verl.- und Wirtschaftsges. der Elektrizitätswerke.
- Foglia, A.; Sonderegger, W.; Niemz, P.; Bader, H.; Weber, A (2006): Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit neuartiger Holzwerkstoffe und Werkstoffverbunde. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Fort, Karel (2001): Type 360: Floor heating and hypocaust. Volketswil.
- Frank, Walther (1975): Raumklima und thermische Behaglichkeit. Literaturlauswertung ; mit 21 Bildern und 12 Tabellen. Berlin: Ernst (Berichte aus der Bauforschung, 104).
- Gagge, Adolf Pharo (1940): STANDARD OPERATIVE TEMPERATURE, A GENERALIZED TEMPERATURE SCALE, APPLICABLE TO DIRECT AND PARTITIONAL CALORIMETRY. In: American Journal of Physiology-Legacy Content (131.1), S. 93–103. Online verfügbar unter <https://www.physiology.org/doi/abs/10.1152/ajplegacy.1940.131.1.93>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Gamper, Andreas; Dietsch, Philipp; Merk, Michael (2013): Gebäudeklima - Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. (Forschungsinitiative ZukunftBau, F 2816).
- Gecks, Jens; Plagge, Rudolf (2015): Massivholzplatten mit Funktionselementen in der Mittellage. Hg. v. Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH. Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH. Dresden. Online verfügbar unter https://www.ihd-dresden.de/fileadmin/user_upload/pdf/Traegerverein/IGF_Vorhaben_Nr_17441_Massivholzplatten_mit_Funktionselementen_in_der_Mittellage.pdf, zuletzt geprüft am 01.03.2019.
- Geier, Sonja; Keikut, Frank; Winterberger, Franziska; Stieglmeier, Manfred; Huss, Wolfgang; Schuster, Sandra (Hg.) (2017): leanWOOD. Best Practice im vorgefertigten Holzbau. Unter Mitarbeit von Technische Universität München. 7 Bände. München. Online verfügbar unter http://www.holz.ar.tum.de/fileadmin/w00bne/www/leanWood/leanWood_FinalReport.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Glück, Bernd (1999): Thermische Bauteilaktivierung Bauteilheizung und Bauteilkühlung. Hg. v. Rud. Otto Meyer-Umwelt-Stiftung. Online verfügbar unter <http://berndglueck.de/dl/?dl=bauteilaktivierung+Bauteilaktivierung.pdf>, zuletzt geprüft am 01.03.2019.
- Glück, Bernd (2008): Innovative Wärmeübertragung und Wärmespeicherung. Unter Mitarbeit von Clina Heiz- und Kühlelemente GmbH Berlin und Westsächsische Hochschule Zwickau (FH). Hg. v. Forschungszentrum Jülich GmbH. Jülich. Online verfügbar unter https://www.lowex.info/downloads/Abschlussbericht_2008.pdf, zuletzt geprüft am 01.07.2018.
- Gräfe, Martin; Hipper, Andreas; Wild, Matthias; Dietsch, Philipp; Winter, Stefan (2018): Vorspannung von Brettsperrholz. München: Technische Universität München.

- Grün, Gunnar (2012): Raumklima und Behaglichkeit. 02 thermische Behaglichkeit. Vorlesungsskript. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Bauphysik, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Hausladen, Gerhard (2010): Energie-Drei-Sprung. Energieplanung, Klimaschutz und Wertschöpfung. In: Landesversammlung, Bayerischer Gemeindetag, S. 27.
- Hausladen, Gerhard; Tichelmann, Karsten (2012): Ausbau Atlas. Integrale Planung, Innenausbau, Haustechnik. 1. Aufl. Basel, München: De Gruyter; Inst. für Internationale Architektur-Dokumentation (Edition Detail). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.11129/detail.9783034614405>.
- Hawley, L., F. (1931): Wood-liquid relations. Washington, D.C. Online verfügbar unter <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uiug.30112101919576;view=1up;seq=1>, zuletzt geprüft am 01.03.2019.
- Henschen, Sören (2018): Messtechnisch und simulationsgestützte Untersuchung des instationären hygrothermischen Verhaltens von thermisch aktivierten Brettsperrholzelementen. Master's Thesis. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Holm, Andreas (2001): Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Lehrstuhl für Bauphysik. Online verfügbar unter https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publicationen/Dissertationen/ah_dissertation_tcm45-30723.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Howell, William C.; Kennedy, Pamela A. (1979): Field Validation of the Fanger Thermal Comfort Model. In: Hum Factors 21 (2), S. 229–239. DOI: 10.1177/001872087902100211.
- Isopp, Anne; Stralz, Richard (2019): Holz. Der Stoff, aus dem die Bäume sind. Hg. v. proHolz Austria. Arbeitsgemeinschaft der Österreichischen Holzwirtschaft. Wien. Online verfügbar unter <http://www.proholz.at/zuschnitt/48/holz/>, zuletzt aktualisiert am 2012, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- ISSO 74, 2014-12: Thermische behaaglijkheid. Online verfügbar unter <https://v.isso.nl/q/fb1aa9c4>, zuletzt geprüft am 12.03.2019.
- Jensen, Søren Østergaard; Marszal-Pomianowska, Anna; Lollini, Roberto; Pasut, Wilmer; Knotzer, Armin; Engelmann, Peter et al. (2017): IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings. In: ENB, S. 25–34. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.08.044.
- Kabelac, Stephan (2006): VDI-Wärmeatlas. Zehnte, bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-32218-4>.

- Kalz, Doreen; Klein, Konstantin; Palzer, Andreas; Schlösser, Tim (2018): Netzdienliche Gebäude und Quartiere. Gebäude entlasten Stromnetze. In: Informationsdienst, BINE (Themeninfo II/2018), zuletzt geprüft am 29.06.2018.
- Kalz, Doreen; Koenigsdorff, Roland (2016): Nichtwohngebäude effizient heizen und kühlen. Erfahrungen mit thermoaktiven Bauteilsystemen und Wärmepumpen. In: Informationsdienst, BINE (Themeninfo II/2016). Online verfügbar unter http://www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Themeninfos/Themen_0216/themen_0216_internetx.pdf, zuletzt geprüft am 29.06.2018.
- Kaufmann, Hermann; Krötsch, Stefan; Winter, Stefan (2017): Atlas Mehrgeschossiger Holzbau. 1. Auflage. München: Edition Detail (DETAIL Atlas).
- Kaufmann, Hermann; Mayerhofer, Stefan; Hausladen, Gerhard; Fröhler, Robert (2008): Entwicklung von grundsätzlichen Strategien zur Energie- und Raumklimaoptimierung von Holzbauten für Büro- und Verwaltungsbau TP 03.
- Keylwerth, R. (1949): Einfache Kontrollmessung bei der Holz Trocknung. In: Holz- Zentralblatt, S. 307–309.
- KfW Bankengruppe (2018): Anlage zu den Merkblättern: Energieeffizient Bauen und Sanieren - Nichtwohngebäude. Technische Mindestanforderungen. Hg. v. KfW Bankengruppe. Frankfurt, zuletzt geprüft am 17.08.2018.
- KfW Bankengruppe (2018): Anlage zum Merkblatt: Energieeffizient Bauen. Technische Mindestanforderungen. Hg. v. KfW Bankengruppe. Frankfurt, zuletzt geprüft am 17.08.2018.
- KIMO Instruments (2018): Produktdaten zum Kimo-Thermoanemometer. Parc d'activités de l'Orée de Chevry. Online verfügbar unter <http://kimo-instruments.com/en/portable/vt-110-vt-115>, zuletzt geprüft am 17.04.2018.
- Kollmann, Franz (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit. 2. Aufl. Berlin: Springer.
- Kollmann, Franz (1955): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Zweiter Band: Holzschutz, Oberflächenbehandlung, Trocknung und Dämpfen, Veredelung, Holzwerkstoffe, Spanabhebende und Spanlose Holzbearbeitung Holzverbindungen. Zweite Neubearbeitete und Erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-52947-4>.
- Kornadt, Oliver; Carrigan, Svenja; Schöndube, Tim; Winter, Stefan; Mindrup, Klaus (2018): Dynamisch thermisch-hygrisches Verhalten von Massivbaukonstruktionen: Entwicklung eines Wärmespeicherfähigkeitsindex für Gebäude aus Mauerwerk und thermisch aktivierbare Massivholzelemente. Kaiserslautern.

- Kraniotis, Dimitrios; Langouet, Nathan; Orskaug, Thomas; Nore, Kristine; Glasø, Geir (Hg.) (2016): Moisture buffering and latent heat sorption phenomena of a wood-based insulating sandwich panel. World Conference on Timber Engineering - WCTE 2016. Wien, 22.08.2016. Vienna University of Technology. Wien: Universität Wien.
- Krus, Martin (1995): Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik. Online verfügbar unter <https://wufi.de/literatur/Krus%201995%20-%20Feuchtetransport-%20und%20Speicherkoeffizienten%20por%C3%B6ser%20mineralischer.pdf>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Künzel, Hardwig (2017): WUFI® Plus. Wärme und Feuchte. Version. Holzkirchen: Fraunhofer Institut für Bauphysik. Online verfügbar unter <https://wufi.de/de/software/wufi-plus/>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Künzel, Hardwig (2018): WUFI® 2D. Version. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. Online verfügbar unter <https://wufi.de/de/software/wufi-2d/>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Künzel, Hardwig M. (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Lehrstuhl für Konstruktive Bauphysik. Online verfügbar unter <https://wufi.de/literatur/K%C3%BCnzel%201994%20-%20Verfahren%20zur%20ein-%20und%20zweidimensionalen.pdf>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Langevin, Jared; Wen, Jin; Gurian, Patrick L. (2013): Modeling thermal comfort holistically: Bayesian estimation of thermal sensation, acceptability, and preference distributions for office building occupants. In: Building and Environment 69, S. 206–226. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.07.017.
- Maschinenfabrik Gg. Kiefer GmbH (2018): Produktbeschreibung zur Luftgeführten Betonkernaktivierung Concretcool. Maschinenfabrik Gg. Kiefer GmbH. Stuttgart. Online verfügbar unter <https://www.kieferklima.de/produkte/betonkerntemperierung-concretcool/>, zuletzt geprüft am 17.04.2018.
- Mayer, E.: Ist die bisherige Zuordnung von PMV und PPD noch richtig? Klimatechnik/Behaglichkeit. In: Hühlig Müller (Hg.): KI LUFT UND KÄLTETECHNIK. Zeitschrift für Forschung, Entwicklung, Herstellung und Anwendung in der Kälte-, Kryo-, Klima-, Luftreinhaltungstechnik und Kältekonserverung, Bd. 12. Heidelberg, S. 575–577.
- Mestek, Peter; Werther, Norman; Winter, Stefan (2010): Bauen mit Brettsper Holz - Tragende Massivholzelemente für Wand Decke und Dach. In: Holzbau Handbuch (Reihe 4 | Teil 6 | Folge 1), S. 1–36. Online verfügbar unter http://informationsvereinholz.de/ivh/wp-content/uploads/2010/03/R4_T6_F1-Brettsper Holz-2012-klein.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2019.

- Mugrauer, Thomas (2018): Produktdaten zum Scanntronik Holzfeuchte-Messsystem. Unter Mitarbeit von Dipl.-Ing. Thomas Mugrauer. Hg. v. Scanntronik Mugrauer GmbH. Zorneding. Online verfügbar unter www.scanntronik.de/, zuletzt geprüft am 17.04.2018.
- Müller, Hüthig (Hg.): KI LUFT UND KÄLTETECHNIK. Zeitschrift für Forschung, Entwicklung, Herstellung und Anwendung in der Kälte-, Kryo-, Klima-, Luftreinhaltungstechnik und Kältekonservierung. Heidelberg.
- Neroth, Günter; Vollenschaar, Dieter (2011): Wendehorst Baustoffkunde. Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz; mit 363 Tabellen. 27., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4>.
- Niemz, Peter (1993): Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verl. (Holz).
- Niemz, Peter (2011): Holz und Holzwerkstoffe. Holz und Holzwerkstoffe. Skript zur Vorlesung Werkstoffe I. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich. Online verfügbar unter https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ifb/ifb-dam/homepage-IfB/Education/bsc_courses/bsc-materials-I/documents/Werkstoffe1_Holz2011.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Niemz, Peter; Sonderegger, Walter Ulrich (2017): Holzphysik. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.3139/9783446445468>.
- Nore, Kristine; Olsson, Marcus (Hg.) (2014): POTENTIAL ENERGY SAVINGS BY USING WOOD SURFACES IN BATHROOMS. World Conference on Timber Engineering. Quebec, 10.08.2014. 2014. Aufl.
- Nutsch, Wolfgang (2007): Fachkunde Holztechnik. 21. Aufl. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel.
- Perez Fernandez, Nicolas (2012): Thermal performance of buildings with post-tensioned timber structure compared with concrete and steel alternatives. Dissertation. University of Canterbury, Canterbury. Department of Civil and Natural Resources Engineering.
- Pfafferott, Jens; Kalz, Doreen; Koenigsdorff, Roland (2015): Bauteilaktivierung. Einsatz - Praxiserfahrungen - Anforderungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.
- Pfafferott, Jens; Kalz, Doreen; Koenigsdorff, Roland (2015): Bauteilaktivierung. Einsatz - Praxiserfahrungen - Anforderungen. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. Online verfügbar unter <https://www.bauingenieur24.de/buecher/bauteilaktivierung-einsatz-praxiserfahrungen-anforderungen-jens-pfafferott/3816793576.htm>, zuletzt geprüft am 01.03.2019.

- Pistohl, Wolfram; Rechenauer, Christian; Scheuerer, Birgit (2016): Handbuch der Gebäudetechnik. Planungsgrundlagen und Beispiele. 9., überarbeitete Auflage. Köln: Bundesanzeiger Verlag.
- Prog (2017): Plancksches Strahlungsspektrum. CC BY-SA 4.0. Mountain View, CA 94042. Online verfügbar unter https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f2/BlackbodySpectrum_loglog_de.svg, zuletzt aktualisiert 2017, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Purmo DiaNorm Wärme AG (2007): SKR-Verbundrohr. Technik/Preisliste. Vienenburg. Online verfügbar unter http://www.purmo.com/docs/downloads/PL_PUR_SKR_web.pdf, zuletzt aktualisiert am 2017, zuletzt geprüft am 15.11.2017.
- Schaffrath, Jörg (2015): Untersuchungen zu Feuchtetransportvorgängen und feuchteinduzierten Verformungen sowie Spannungen bei Betrachtung verschiedener Holzarten und unterschiedlicher klimatischer Randbedingungen. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Schmidt, Dietrich (2016): Netzreaktive Gebäude. Verbundvorhaben Netzreaktive Gebäude – Ganzheitliche Bewertung von Bauphysik und Gebäudeenergiesystemen einschließlich ihrer Rolle in der Energiewirtschaft – Energie, Exergie, Leistungsbezug und -abgabe. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE). Stuttgart. Online verfügbar unter <https://www.netzreaktivegebäude.de/>, zuletzt aktualisiert am 2016, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Schneider, Adolf; Engelhardt, Fritz (1977): Vergleichende Untersuchungen über die Wärmeleitfähigkeit von Holzspan- und Rindenplatten. In: Holz als Roh- und Werkstoff 35 (7), S. 273–278. DOI: 10.1007/BF02619357.
- Schulz, Gerd (1995): Regelungstechnik. Grundlagen, Analyse und Entwurf von Regelkreisen, rechnergestützte Methoden. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-79783-5>.
- Schwenk, C.; Maas, A. (2014): Betonkernaktivierung mit Luft am Beispiel eines ENOB Projektes - Vergleichende Systemsimulation. Universität Kassel. Kassel. Online verfügbar unter http://www.ibpsa.org/proceedings/bausimPapers/2014/p1161_final.pdf, zuletzt geprüft am 01.03.2019.
- Siau, John Finn (1984): Transport Processes in Wood. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer Series in Wood Science, 1431-8563, 2).
- Sonderegger, Walter; Hering, Stefan.; Mannes, David.; Vontobel, Peter.; Lehmann, Eberhard.; Niemz, Peter: Quantitative determination of bound water diffusion in multilayer boards by means of neutron imaging, Volume 68, S. 341–350. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-010-0463-5>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.

- Spernau, Marc (2019): Hypothermal - Ziegel-Wandheizung. ÖKOHAUS. Bamberg. Online verfügbar unter <http://www.hypothermal.de/ziegel-wandheizung.htm>, zuletzt aktualisiert am 2019, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Springer (Hg.): European Journal of Wood and Wood Products. Holz als Roh- und Werkstoff. Online verfügbar unter <https://doi-org.eaccess.ub.tum.de/10.1007/s00107-010-0463-5>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Stadtverwaltung Weißenburg i. Bay. (2018): Römische Thermen. Hg. v. Große Kreisstadt Weißenburg i. Bay. Regensburg. Online verfügbar unter <https://www.uni-regensburg.de/sprache-literaturkultur/lateinische-philologie/res-gestae/exkursionen/raetia-i/index.html>, zuletzt aktualisiert am 27.10.2004, zuletzt geprüft am 15.03.2018.
- Tinkerforge GmbH (2018): Produktdaten zu Tinkerforge Mess-, Steuerungs- und Regelungskomponenten. Hg. v. Tinkerforge GmbH. Schloß Holte-Stukenbrock. Online verfügbar unter <https://www.tinkerforge.com>, zuletzt geprüft am 02.20.2019.
- Transsolar Energietechnik GmbH (2017): Komponenten TRNSYS Standardpaket. Hg. v. Transsolar Energietechnik GmbH. Transsolar Energietechnik GmbH. Stuttgart. Online verfügbar unter https://trnsys.de/docs/trnsys/trnsys_uebersicht_de.htm, zuletzt geprüft am 01.03.2019.
- Transsolar Energietechnik GmbH (2019): TRNSYS - TRaNsient SYstems Simulation. Version 17. Stuttgart: Transsolar Energietechnik GmbH. Online verfügbar unter https://trnsys.de/docs/trnsys/trnsys18_Neuheiten_de.htm, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Tsoupras, Ermis (2018): Untersuchung der baupraktischen Anwendbarkeit thermisch aktivierter Mas-sivholzelemente. Master´s Thesis. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- van Hoof, J. (2008): Forty years of Fanger's model of thermal comfort: Comfort for all? In: Indoor air 18. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2007.00516.x.
- VDI 2078, 2015-06: Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühl-last und Jahressimulation).
- VDI 6034, 2017-08: Raumkühlflächen Planung, Bau und Betrieb.
- Vitopoulou, Anastasia (2018): Einsatzszenarien der thermischen Bauteilaktivierung luftdurchström-ter Massivholzbau-elemente in der zukünftigen Versorgungsstruktur. Master´s Thesis. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Vollenschaar, D. (Hg.) (2004): Wendehorst Baustoffkunde. 26. überarbeitete Auflage 2004. Wiesba-den, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-11829-9>.

- Wehsener, Jörg; Schulz, Tino; Gecks, Jens; Krug, Detlef; Bishara, Nadja; Plagge, Rudolf (2016): Untersuchungen zu mehrlagigen Massivholzplatten als Heiz- und Kühlelement. In: Bauphysik 38 (3), S. 129–134. DOI: 10.1002/bapi.201690023.
- WEM GmbH (2017): Technisches Datenblatt WEM Lehm-Feinputz. WEM(R) GmbH. Urmitz. Online verfügbar unter https://wandheizung.de/fileadmin/user_upload/Redakteure/Gemeinsame_Dateien/Dokumente/DB/121_DB-WEM-Lehm-Feinputz.pdf, zuletzt aktualisiert am 2017, zuletzt geprüft am 15.11.2017.
- WEM GmbH (2017): WEM Klimaregister. Technisches Datenblatt. Online verfügbar unter https://wandheizung.de/fileadmin/user_upload/Redakteure/Gemeinsame_Dateien/Dokumente/DB/111_DB-Klimaregister.pdf, zuletzt aktualisiert am 2017, zuletzt geprüft am 30.11.2017.
- Wesche, Karlhans (1988): Baustoffe für tragende Bauteile. Holz, Kunststoffe (Organische Stoffe). 2., völlig neubearb. u. erw. Aufl. Wiesbaden: Bauverl.
- Wienerberger AG (2019): Wienerberger-Ziegelwand-Temperierung. Wienerberger AG. Wien. Online verfügbar unter <https://wienerberger.at/bauen-mit-ziegel/die-ziegelwand-temperierung-%C3%A4%C3%9Ft-keinen-kalt>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.
- Willems, Wolfgang M.; Fischer, Heinz-Martin; Freymuth, Hanns; Häupl, Peter; Homann, Martin; Jenisch, Richard et al. (2012): Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9467-0>, zuletzt geprüft am 20.02.2019.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Der Energie-Dreisprung nach (Hausladen 2010).....	4
Abbildung 1.2: Auswirkung der Rohdichte und der spezifischen Wärmekapazität der raumumschließenden Baustoffe auf das sommerliche Überhitzungsverhalten anhand einer hygrothermischen Raumklimasimulation von Klimatestgebäuden; in Anlehnung an (Ertl 2017).....	6
Abbildung 1.3: Einordnung und Abgrenzung des Promotionsvorhabens.....	8
Abbildung 2.1: chemische Zusammensetzung des Holzes (Neroth/Vollenschaar 2011)	11
Abbildung 2.2: Aufbau einer Holzzelle (Isopp/Stralz 2012).....	11
Abbildung 2.3: Schematische Darstellung von Nadelholz; aus (Wesche 1988).....	12
Abbildung 2.4: Schematische Darstellung von Laubholz; aus (Wesche 1988)	12
Abbildung 2.5: Bezeichnung der drei Hauptrichtungen des Holzes; aus: (Schaffrath 2015)	14
Abbildung 2.6: Anatomischer Strukturaufbau eines Stammes; aus: (Neroth/Vollenschaar 2011)	14
Abbildung 2.7: Querschnitt eines Nadelholzstammes; aus: (Neroth/Vollenschaar 2011).....	15
Abbildung 2.8: links: Produkt Brettsperrholz; rechts: Rohbau aus Brettsperrholzwandtafeln; aus: (Mestek/Werther/Winter 2010).....	16
Abbildung 2.9: Herstellungsprozess von Brettsperrholz; in Anlehnung an (Mestek/Werther/Winter 2010)	18
Abbildung 2.10: Zusammenhang zwischen der Holzfeuchte u und dem massebezogenen Wassergehalt ω bzw. dem volumenbezogenen Wassergehalt Θ bei einer trocken-Rohdichte des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Brettsperrholzes von 423 kg/m^3	21
Abbildung 2.11: Wasseraufnahme und -abgabe des Holzes; aus: (Nutsch 2007).....	22
Abbildung 2.12: Skizze einer möglichen Holzfeuchteentwicklung und Wahrscheinlichkeitsbewertung von Rissentstehung vom Baum bis zum verbauten Brettschichtholz; in Anlehnung an: (Gamper/Dietsch/Merk 2013).....	23
Abbildung 2.13: Wirksame Bindungsformen des Wassers in Abhängigkeit der Holzfeuchte nach (Niemz 1993)	24
Abbildung 2.14: Ad- und Desorptionsisotherme als Funktion der materialspezifischen Ausgleichsfeuchte und der relativen Luftfeuchte, der Temperatur und des Luftdrucks; aus: (Niemz/Sonderegger 2017).....	26

Abbildung 2.15: Sorptionsisothermendiagramm für Sitka-Fichte in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte; aus: (Niemz 1993) mit Daten von Loughborough von (Hawley, L., F. 1931)dargestellt und von (Keylwerth 1949) ins metrische System umgerechnet.....	27
Abbildung 2.16: Schematische Darstellung des Feuchtetransports in Baustoffporen abhängig von der Baustofffeuchte; aus: (Künzel 1994)	28
Abbildung 2.17: Profile des Feuchtegehalts durch die Proben der Serie 1 mit 1, 3 und 5 Klebefugen während des Diffusionsprozesses (feine Linien = experimentelle Werte; fette Linien = berechnete Kurven); (a-c) UF, (d-f) 1K-PUR; aus (Sonderegger et al. 2010)	32
Abbildung 2.18: Schematische Darstellung eines Adsorptionsprozesses in einem dreidimensionalen Feuchtegehalt-Temperatur-Zeit-System. Konzept von (Engelund et al. 2012)	33
Abbildung 2.19: Schematische Darstellung der Wärmetransportmechanismen.....	36
Abbildung 2.20: Wärmeleitfähigkeit von Massivholzplatten aus Nadelholz bei einer Holzfeuchte von $u = 12\%$ und einer Temperatur von 20 °C ; aus: (Bader 2005)	38
Abbildung 2.21: Wärmeleitfähigkeit über der Rohdichte in Abhängigkeit der Faserrichtung im Nadelholz bei einer Holzfeuchte von $u = 10\%$ und einer Temperatur von 20 °C ; aus: (Vollenschaar 2004)	39
Abbildung 2.22: links: Brettsperrholzprobekörper und rechts: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.....	40
Abbildung 2.23: Gemessene Wärmeleitfähigkeiten der untersuchten Brettsperrholzelemente bei unterschiedlichen Materialfeuchten	41
Abbildung 2.24: Geschwindigkeitsprofil der erzwungenen Kanalströmung; links: laminar und rechts: turbulent.....	47
Abbildung 2.25: Spektrale, flächenspezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers bei unterschiedlichen Temperaturen; in Anlehnung an (Prog 2017)	52
Abbildung 2.26: Basiskennlinien für Wärmeübergangskoeffizienten α^* von thermoaktiven Bauteilen.....	57
Abbildung 2.27: links: Entladungsfrequenzen von Kalt- und Warmrezeptoren, minimale Stimulation bei $34,5\text{ °C}$ nach (Zotteman1953); rechts: Haut- und Trommelfelltemperaturen eines Probanden, unbedeckt: schattierter Bereich: thermisch unkomfortabel (Benzinger 1979) aus (Grün 2012)	62
Abbildung 2.28: links: der menschliche Wärmehaushalt, qualitativ, rechts: Wärmeabgabe des Menschen normal bedeckt, ruhend; aus (Albers/Recknagel/Sprenger 2017)	63

Abbildung 2.29: Zusammenhang zwischen PMV und PPD nach diversen Autoren; links aus: (van Hoof 2008) rechts aus: (Langevin/Wen/Gurian 2013)	64
Abbildung 2.30: Auslegungswerte für operative Innenraumtemperatur von Gebäuden ohne maschinelle Kühlanlage, dargestellt als Funktion des gewichteten gleitenden Mittelwertes der Außenlufttemperatur (DIN EN 15251 2012, Kapitel A.2)	66
Abbildung 2.31: links: Behaglichkeitsfeld für die Raumlufttemperatur und die gemittelte Temperatur der Umschließungsflächen nach (Frank 1975), rechts: beispielhafte Oberflächentemperaturen der raumabschließenden Bauteile mit rückseitiger Kühlfläche in Anlehnung an (Emmel 2017).....	69
Abbildung 2.32: links: Lokale thermische Unbehaglichkeit durch asymmetrische Strahlungs-temperaturen von Wänden und Decken nach (DIN EN ISO 7730:2005) rechts: lokale thermische Unbehaglichkeit durch warme oder kalte Fußbodenoberflächentemperaturen	70
Abbildung 2.33: lokale Unbehaglichkeit durch vertikale Lufttemperaturunterschiede zwischen Fuß- und Kopfhöhe einer erwachsenen Person (DIN EN ISO 7730:2005).....	72
Abbildung 2.34: Schema der historischen Hypokaustenheizung der Römer, rechts Römisches Thermalbad der Stadt Weißenburg in Bayern (Stadtverwaltung Weißenburg i. Bay. 27. 10. 2004), (Bosy 2017)	74
Abbildung 2.35: Das System Concretcool der Firma Kiefer (Maschinenfabrik Gg. Kiefer GmbH)	75
Abbildung 2.36: Massivholzplatten mit Funktionselementen in der Mittellage aus einem Forschungsprojekt des Internationalen Vereins für Technische Holzfragen e. V.;(Wehsener et al. 2016)	76
Abbildung 3.1: Das Beispielprodukt für die Entwicklung thermisch aktivierter Massivholzelemente; aus: (Binderholz GmbH 2019)	80
Abbildung 3.2: Schema eines luftführenden thermisch aktivierten Massivholzelements; in Anlehnung an (Baumgartner 2018)	81
Abbildung 3.3: Mögliche Konfigurationen von thermisch aktivierten Massivholzelementen; links: Innenwand, Mitte: Zonen-/ Wohnungstrennwand; rechts: Außenwand.....	83
Abbildung 3.4: Schema eines Büroraumes mit thermisch aktivierten Wandelementen und einem Achsraster von 1,25 m	84
Abbildung 3.5: Doppelbüro mit ca. 30 m ² Grundfläche, vollverglaster Fassade mit außenliegendem Sonnenschutz, vier thermisch aktivierte Massivholzelemente.....	85
Abbildung 3.6: Gruppenbüro mit ca. 76 m ² Grundfläche, vollverglaster Fassade mit außenliegendem Sonnenschutz, zwölf thermisch aktivierte Massivholzelemente	86

Abbildung 3.7: Energieflussdiagramm mit farblicher Kennzeichnung der Bilanzgrenze der Analyse; in Anlehnung an (Vitopoulou 2018).....	87
Abbildung 3.8: links: Mäanderförmige Serien-Schaltung der Kanäle mit einseitiger Erschließung im Sockelbereich; rechts: Harfenförmige Parallel-Schaltung mit diagonaler Erschließung, horizontale Einzelkanäle.....	98
Abbildung 3.9: links: Harfenförmige Parallelschaltung mit diagonaler Erschließung, vertikale Einzelkanäle; rechts: Harfenförmige Serien-Parallelschaltung mit Erschließung im Sockelbereich, vertikale Einzelkanäle.....	99
Abbildung 3.10: Prototyp A mit der luftführenden Schicht in Brettlamellenlage drei	101
Abbildung 3.11: Prototyp B mit der luftführenden Schicht in Brettlamellenlage zwei.....	102
<i>Abbildung 4.1: Links: rückseitiges Halbelement aus den Schichten 3, 4, 5; rechts: vorderseitiges Halbelement aus den Schichten 1, 2.....</i>	<i>104</i>
Abbildung 4.2: Abbund-Bemaßung für die Herstellung der prototypischen Probekörper A und B; aus (Binderholz GmbH 2019)	105
Abbildung 4.3: Vor dem Abbund durch das Portalbearbeitungszentrum wird das Halbelement auf dem Werkstückträger ausgerichtet, fixiert und geometrisch über einen Laser referenziert	106
Abbildung 4.4: Das Layout für den Abbund wird mittels Maschinen-Code dreidimensional vorgegeben und automatisch in Bearbeitungsschritte gegliedert	106
Abbildung 4.5: Der Abbund der Halbelemente erfolgt mit einem 30 mm-Fingernutfräser	107
Abbildung 4.6: Das Fräsen der Kanäle in Schicht zwei hat auch quer zur Faserrichtung dort problemlos funktioniert, wo die Lamellen schmalseitenverklebt sind	107
Abbildung 4.7: Der Auftrag des Klebers erfolgt manuell auf das rückseitige Halbelement	108
Abbildung 4.8: Produktionsfolge Fräsen der Kanäle, Kleberauftrag, Zusammenklappen, Verpressen und Aushärten (Binderholz GmbH 2019)	108
Abbildung 4.9: Verpressen und Aushärten der Halbelemente im hydraulischen Pressbett	109
Abbildung 4.10: Zuschnitt des Brettsperrholzelements in die beiden prototypischen Probekörper A und B und Vorbereitung des Abtransports zur Technischen Universität München	109
Abbildung 4.11: Zur späteren Positionierung der Messsensoren wurden die Stege stirnseitig markiert...	110

Abbildung 4.12: Gefaster und nicht verklebter Plattenstoß zwischen den Massivholzplatten der zweiten Schicht links vor und rechts nach dem Fräsen	111
Abbildung 4.13: Bereinigen der Bruchkante und Einsetzen von Füllstücken zur Vermeidung von hydraulischen Kurzschlüssen im System.....	111
Abbildung 4.14: Versiegelung zur Vermeidung hydraulischer Kurzschlüsse entlang der V-Nut	112
Abbildung 4.15: Eintritt von Kleber in einen Luftkanal.....	112
Abbildung 4.16: Einschnürung durch PU-Schaum-Kleber und Harzgallen; Auswertung für Prototyp B.....	113
Abbildung 4.17: Methodisches Vorgehen bei der experimentellen und theoretischen Untersuchung.....	115
Abbildung 4.18: Visualisierung der Versuchskonfiguration – Links: Vorderansicht, Mitte: Vorderansicht mit ausgeblendeter erster Schicht, Rechts: Rückansicht des Prototyp B.....	117
Abbildung 4.19: Mobile Versuchskonfiguration Prototyp A; links: Vorderansicht, rechts: Rückansicht ...	117
Abbildung 4.20: Hydraulik- und Regelungsschema der Systemluftkonditionierung	118
Abbildung 4.21: Versuchskonfiguration mit Prototyp B und Klimamessstation.....	119
Abbildung 4.22: Datenpunkte im Systemluftkreislauf und an der Elementoberfläche	120
Abbildung 4.23: Holztemperatursensoren: links - Prototyp A; rechts - Prototyp B	121
Abbildung 4.24: Holzfeuchtesensoren: links - Prototyp A; rechts - Prototyp B.....	121
Abbildung 4.25: Verlauf der Oberflächentemperatur im Heizbetrieb (qualitativ überzeichnet) über der abgewickelten Strömungsweglänge des thermisch aktivierten Massivholzelements.....	124
Abbildung 4.26: Verlauf der Oberflächentemperatur im Kühlbetrieb ($TVL = 15,8 \text{ }^\circ\text{C}$) an Prototyp B.....	125
Abbildung 4.27: Thermische Leistungsdaten zum Szenario: Heizen- $45 \text{ }^\circ\text{C}$ -Abschalten an Prototyp B.....	128
Abbildung 4.28: Zeitliche Änderung der Temperaturverläufe beim Aufheizvorgang im Querschnitt des Massivholzelements, die thermisch aktivierte Schicht ist hellrot markiert	129
Abbildung 4.29: Thermische Leistungsdaten zum Szenario: Kühlen $16 \text{ }^\circ\text{C}$ – Heizen $45 \text{ }^\circ\text{C}$ an Prototyp B ...	131
Abbildung 4.30: Zeitliche Änderung der Temperaturverläufe beim Abkühlvorgang im Querschnitt des Massivholzelements, die thermisch aktivierte Schicht ist hellblau markiert	132

Abbildung 4.31: Zeitliche Änderung der Temperaturverläufe beim Umschalten von aktivem Kühlen auf aktives Heizen im Querschnitt des Massivholzelements die thermisch aktivierte Schicht ist hellrot markiert	133
Abbildung 4.32: Materialfeuchteentwicklung im Kühlbetrieb	135
Abbildung 4.33: oben: Zeitliche Änderung der Holzfeuchte und unten: der Temperatur, während des Kühlbetriebs im Querschnitt des Massivholzelements, die aktivierte Schicht ist hellblau markiert ...	137
Abbildung 4.34: Materialfeuchteentwicklung im Heizbetrieb an Prototyp B	139
Abbildung 4.35: Zeitliche Änderung der Holzfeuchte während des Kühlbetriebs im Querschnitt des Massivholzelements, die aktivierte Schicht ist hellrot markiert	139
Abbildung 4.36: Untersuchung der Oberfläche auf Schwindrisse am 18.07.2018.....	140
Abbildung 4.37: Vergleich der Holzfeuchtebestimmung durch das Darrtrocknungsverfahren und das elektrische Widerstandsverfahren an Prototyp B	142
Abbildung 4.38: Bestimmung des Volumenstromes im Systemluftkreislauf bei Prototyp B.....	143
Abbildung 4.39: Aerodynamische Messpunkte zur Bestimmung des statischen und kinetischen Drucks ..	144
Abbildung 4.40: Messung des kinetischen und statischen Druckströmungsfeldes in Prototyp B.....	145
Abbildung 4.41: Strömungslinienvisualisierung in den Übergängen der Vertikalkanäle; links: Prototyp B, rechts Optimierungsvorschlag; in Anlehnung an: (Ertl 2019).....	146
Abbildung 4.42: Vergleiche von Simulation und Messdaten; äußerst links: Simulation des statischen Drucks; Mitte-Links: Messung des statischen Drucks; Mitte-Rechts: Simulation der Geschwindigkeiten; rechts: Messung der Geschwindigkeiten; in Anlehnung an: (Ertl 2019)	147
Abbildung 4.43: Stromlinienvisualisierung des optimierten Aufbaus aus (Ertl 2019) mit Ergänzung weiterer unbewiesener Optimierungsvorschläge (qualitative Falschfarbendarstellung des dynamischen Drucks entlang der Strömungslinien).....	148
Abbildung 5.1: Vorgehen bei der stationären Auslegung von Heizsystemen.....	150
Abbildung 5.2: Systematik der stationären Berechnung der Raum- bzw. Gebäudeheizlast	150
Abbildung 5.3: Schaltbild der thermischen Wärmewiderstände am Beispiel einer wasserführenden Estrich-Fußbodenheizung; in Anlehnung an DIN EN 1264 und DIN EN ISO 11855	151
Abbildung 5.4: ‚Prinzip des Verfahrens zur Bestimmung der Grenzwerte der spezifischen Wärmeleistung‘; Bild A5 aus DIN EN 1264-2:2013-03 / Bild A4 aus DIN EN ISO 11855-2:2016-11.....	153

Abbildung 5.5: Systematik der instationären Auslegung von Kühlflächen	154
Abbildung 5.6: Thermodynamische Vorgänge des thermisch aktivierten Massivholzelements; in Anlehnung an (Baumgartner 2018)	157
Abbildung 5.7: links: Modell des Temperaturverlaufs einer Rohrleitung innerhalb eines Bauteils; rechts: Temperaturfeld um ein Rohrelement innerhalb eines thermisch aktivierten Bauteils in Anlehnung an: (Transsolar Energietechnik GmbH 2019)	159
Abbildung 5.8: Einbindung des TYPE 360 in die TRNSYS-Simulationsumgebung.....	161
Abbildung 5.9: Geometrische Definition des Finite-Differenzen-Gitters; Abbildung in Anlehnung an (Vitopoulou 2018)	161
Abbildung 5.10: Grundrisschema - Verknüpfung des Bauteilmodells mit dem Raummodell	162
Abbildung 5.11: Vergleich der empirischen Berechnungsmodelle für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für vertikale Heiz- und Kühlflächen nach (Fort 2001) und (Glück 2008)	164
Abbildung 5.12: Mögliche Schaltbilder von Fluidkreisläufen des TYPE 360.....	166
Abbildung 5.13: Aufbau des numerischen Validierungsmodells TRNSYS 17 Simulationsstudio (Transsolar Energietechnik GmbH 2019)	167
Abbildung 5.14: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Daten	169
Abbildung 5.15: Gegenüberstellung der gemittelten Werte aus Simulation und Messung im stationären Zustand; linke Hälfte Kühlbetrieb, rechte Hälfte Heizbetrieb; je Säulenpaar: links Simulation, rechts Messung; in Anlehnung an (Vitopoulou 2018).....	170
Abbildung 5.16: zeitliche Verläufe der mittleren gemessenen und simulierten Wärmestromdichte bei unterschiedlichen instationären Betriebswechseln.....	171
Abbildung 6.1: Zustandsänderungen der Raumluft an der thermisch aktivierten Oberfläche; Rot: Heizbetrieb; Blau: Kühlbetrieb für 1,013 bar; in Anlehnung an: (Dolder 2019)	174
Abbildung 6.2: Prognostizierte minimale und maximale Holzausgleichsfeuchte im Heiz- und im Kühlbetrieb; Sorptionsisothermendiagramm aus: (Niemz 1993), (Hawley, L., F. 1931), (Keylwerth 1949) vgl. Abschnitt 2.3.3	175
Abbildung 6.3: Schnittdarstellung und 2D-Modell der hygrisch-thermischen Simulation in WUFI-2D.....	177
Abbildung 6.4: Abhängigkeit zwischen spezifischer Heizleistung und resultierender Holzfeuchte in 40 mm bei einem Umgebungsklima von 20°C / 50 % relativer Luftfeuchte (Henschen 2018)	178

Abbildung 6.5: Abhängigkeit zwischen spezifischer Kühlleistung und resultierender Holzfeuchte in 40 mm bei einem Umgebungsklima von 20°C / 50 % relativer Luftfeuchte (Henschen 2018)	179
Abbildung 6.6: Reale Schnittdarstellung von Prototyp A mit Illustrierung des 2D-Knotenmodells.....	180
Abbildung 6.7: Reale Schnittdarstellung von Prototyp B mit Illustrierung des 2D-Knotenmodells.....	181
Abbildung 6.8: Reale Schnittdarstellung vom Referenzsystem A mit Illustrierung des 2D-Knotenmodells; Darstellung in Anlehnung an (Baumgartner 2018)	182
Abbildung 6.9: Reale Schnittdarstellung vom Referenzsystem B mit Illustrierung des 2D-Knotenmodells; Darstellung in Anlehnung an (Baumgartner 2018)	183
Abbildung 6.10: Systemvergleich im Heizbetrieb bei einer operativen Raumtemperatur von 20 °C Darstellung der mittleren flächenspezifischen Heizleistung und der mittleren Oberflächentemperatur als Funktion der Heizmittelübertemperatur.....	184
Abbildung 6.11: Systemvergleich im Kühlbetrieb bei einer operativen Raumtemperatur von 27 °C Darstellung der mittleren flächenspezifischen Kühlleistung und der mittleren Oberflächentemperatur als Funktion der Kühlmitteluntertemperatur	185
Abbildung 6.12: Grundriss und Eckdaten zum Referenzszenario ‚Doppelbüro‘ mit orange markierten Positionen der thermisch aktivierten Massivholzelemente	187
<i>Abbildung 6.13: Katalog der Bauteilaufbauten für die Simulation des Doppelbüros</i>	<i>189</i>
Abbildung 6.14: Raumklimatische Randbedingungen zur Nutzermodellierung.....	190
Abbildung 6.15: Punktwolkendiagramm zur Darstellung der ganzjährigen operativen Raumtemperaturzustände in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur (8760 Punkte)	192
Abbildung 6.16: Punktwolkendiagramm zur Darstellung der ganzjährigen operativen Raumtemperaturzustände in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur während der Anwesenheit	193
Abbildung 6.17: Vorschlag für den Schichtenaufbau von Prototyp C am Beispiel eines Außenwandbauteils (die Dämmstärke ist nicht maßstäblich).....	194
Abbildung 11.1: Anordnung der Wärmestrommessplatten und Temperatursensoren im Versuchsaufbau: Wärmestrommessplatten- Kaltseite (M42) und Warmseite (M43); Temperatursensoren- Kaltseite (M6) und Warmseite (M4); Heizplatte (H); Probekörper (P); Kühlplatte (ganz oben, nicht abgebildet)	226
Abbildung 11.2: Aluminium-Heizplatte mit rückseitig eingefrästen Nuten und eingelegtem Heizdraht mit einer gesamt Heizleistung von 1100 W	227

Abbildung 11.3: PID-Temperaturregelung auf der Basis des modularen open source Microcontrollersystems von (Tinkerforge GmbH).....	228
Abbildung 11.4: Prüfgerät für die Wärmeleitfähigkeit in geöffnetem Zustand.....	228
Abbildung 11.5: Probeentnahme nach dem Test des Prototyp A zur Bestimmung der Holzfeuchte und Begutachtung der Kanalinnenseiten	231

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Hauptbestandteile von Holz (Neroth/Vollenschaar 2011)	10
Tabelle 2-2: Struktur-Funktionsbeziehungen; aus: (Kollmann 1951).....	13
Tabelle 2-3: Umrechnungstabelle Wassergehalt zu Holzfeuchte.....	20
Tabelle 2-4: Kinematische Zähigkeit ν [m ² /s] bei 1 bar; aus: (Kabelac 2006)	49
Tabelle 2-5: Wärmestromdichte gemäß Basiskennlinie für thermoaktive Bauteile in verschiedenen Einbaulagen und Wärmestromrichtungen nach (Glück 2008).....	56
Tabelle 2-6: Übersichtstabelle mit Kategorien von Raumklimaeigenschaften.....	61
Tabelle 2-7: Komfortzone ausgewählter Richtlinien mit Angaben zum vorgegebenen Akzeptanzbereich in Abhängigkeit der Anlagentechnik des Gebäudes und der Jahreszeit am Beispiel eines Bürogebäudes; in Anlehnung an (Duncker 2017).....	67
Tabelle 2-8: Grenzwerte der Strahlungstemperatur-Asymmetrie für die Bewertung des Umgebungsklimas nach DIN EN ISO 7730	70
Tabelle 2-9: Thermische Behaglichkeit und Leistungsbewertung unterschiedlicher thermisch aktivierter Raumflächen mit Daten zu Strahlungsanteilen aus (Pistohl/Rechenauer/Scheuerer 2016) und Abbildungen aus (Baumgartner 2018)	72
Tabelle 3-1: Vor- und Nachteile einer luftführenden Bauteilaktivierung	91
Tabelle 3-2: Vor- und Nachteile einer wassergeführten Bauteilaktivierung.....	92
Tabelle 3-3: Bewertungsmatrix zur Wahl des Wärmeüberträgermediums	93
Tabelle 4-1: Bestimmung der relativen Temperaturabweichung zwischen dem Oberflächentempersensor DPO und der mittleren Oberflächentemperatur im Kühlbetrieb	125
Tabelle 4-2: Stationäre Mittelwerte zum Versuchsablauf ‚Kühlen -16 °C Heizen -45 °C‘ an Prototyp B	130
Tabelle 4-3: Vergleich zwischen den beiden Verfahren zur Bestimmung bzw. Schätzung der Holzfeuchte nach dem Darr- und dem elektrischen Widerstands-Messverfahren	141
Tabelle 4-4: Messwerte des kinetischen und dynamischen Drucks an Prototyp B [14.08.2018].....	145
Tabelle 6-1: Materialkennwerte für die thermische Modellierung von Prototyp A.....	181
Tabelle 6-2: Materialkennwerte für die thermische Modellierung von Referenzsystem A	182

Tabelle 6-3: Materialkennwerte für die thermische Modellierung von Referenzsystem B.....	183
Tabelle 6-4: Akzeptanzbereich für die operative Innenraumtemperatur in frei belüfteten Bürogebäuden in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur. (Auszug aus Tabelle 2-7)	192
Tabelle 11-1: Materialfeuchtemessung nach Ende des Heizbetriebes an Prototyp A.....	231
Tabelle 11-2: Modell-Eingangsdaten im Vergleich zu den Orientierungswerten der Qualitätsanforderungen an die Gebäudehülle; in Anlehnung an (Vitopoulou 2018).....	232

11 Anhang

Anhang A: Prüfung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Brettsperrholzelementen

Versuchsumfang

Für die Bestimmung der bauteilbezogenen Wärmeleitfähigkeit von Brettsperrholzelementen in Abhängigkeit ihrer Materialfeuchte wurden 15 handelsübliche Brettsperrholz-Probekörper mit den Maßen (L x B x H) 500 mm x 500 mm x 100 mm in drei Chargen zu je fünf Exemplaren auf unterschiedliche Feuchtegehalte konditioniert. Um das für Brettsperrholzelemente praxisrelevante Spektrum der Materialfeuchte abzudecken, wurden bei der Konditionierung Feuchtezustände von $5\% < u < 18\%$ eingestellt. Bei den Experimenten wurde nach Erreichen eines stationären Zustandes der Wärmefluss gemessen und daraus die Wärmeleitfähigkeit errechnet. Auf die primären Messreihen folgend, wurden fünf weitere Stützmessungen im darrgetrockneten Zustand angestellt. Für die Durchführung der Versuche wurde eigens eine Versuchseinrichtung hergestellt. Hierdurch konnten erhebliche Kosten eingespart werden die bei der Beschaffung eines Gerätes zu marktüblichen Preisen, bzw. durch eine Beauftragung einer externen Prüfstelle entstanden wären. Die selbst konstruierte Versuchseinrichtung lässt sich durch die verwendete ‚open source‘ Technologie frei programmieren und im Nachgang der stationären Messungen für die Bestimmung der dynamisch-thermischen Eigenschaften der Brettsperrholzelemente einsetzen.

Messprinzip

Das Wärmestrommessplattengerät misst die Wärmestromdichte in $[W/m^2]$, welche bei bekannter Temperaturdifferenz orthogonal zwischen den Oberflächen des Probekörpers fließt. Auf die Temperaturdifferenz bezogen, entspricht die berechnete Größe dem Wärmedurchgangskoeffizienten mit der Einheit $[W/(m^2 \cdot K)]$ exklusive der Wärmeübergangseffekte an den Oberflächen. Diese werden durch ein Zusammenpressen des Versuchsaufbaus weitgehend eliminiert. Im nächsten Schritt wird der errechnete Wert mit dem mittleren orthogonalen Abstand der Oberflächen multipliziert. Die resultierende Größe entspricht der Wärmeleitfähigkeit mit der Einheit $[W/(m \cdot K)]$.

$$\lambda = \frac{\dot{q}}{(t_{s1} - t_{s2})} \cdot s \quad [W/mK] \quad (3.1)$$

λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des Stoffes
\dot{q}	[W/m ²]	Wärmestrom durch Transmission, absolut
s	[m]	Schichtstärke des Bauteils
t_{si}	[K], [°C]	Temperatur der jeweiligen Oberfläche

Realisierter Versuchsaufbau zur Feststellung der Wärmeleitfähigkeit

Die Prüfung der Wärmeleitfähigkeit wird mit einem Wärmestrommessplattengerät in Anlehnung an DIN EN 12667:2001-05 durchgeführt. Das angewandte Verfahren erfolgt nach dem Aufbau ‚Symmetrische Anordnung mit einem Prüfkörper‘ (Anordnung b) und entspricht Abschnitt 5.3.1 der DIN EN 12667:2001-05. Die Prüfanordnung ist in Abbildung 11.1 dargestellt.

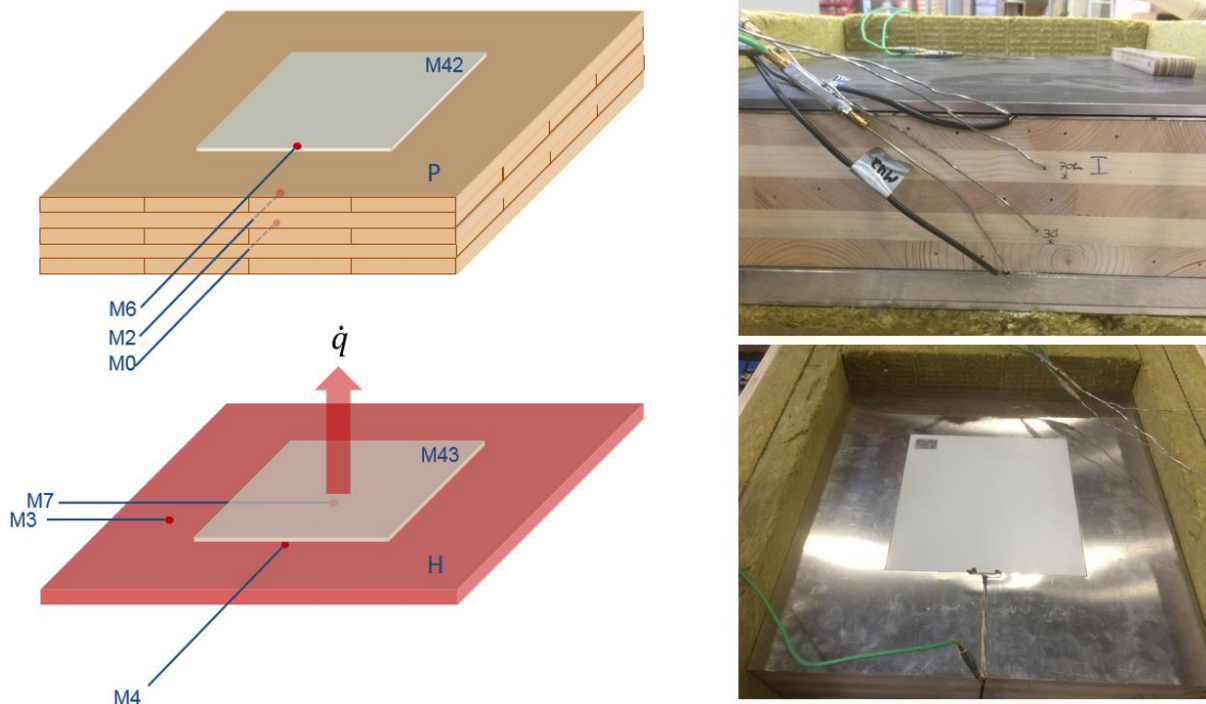


Abbildung 11.1: Anordnung der Wärmestrommessplatten und Temperatursensoren im Versuchsaufbau: Wärmestrommessplatten- Kaltseite (M42) und Warmseite (M43); Temperatursensoren- Kaltseite (M6) und Warmseite (M4); Heizplatte (H); Probekörper (P); Kühlplatte (ganz oben, nicht abgebildet)

Die Hauptbestandteile des Gerätes sind eine Heizplatte, eine Kühlplatte, zwei Wärmestrommessplatten und zwei Temperatursensoren. Der plattenförmige Probekörper wird zwischen Heizplatte und Kühlplatte platziert und der von der Heizplatte zur Kühlplatte fließende Wärmestrom mit Hilfe der Wärmestrommessplatten gemessen. Diese befinden sich in der Versuchsanordnung zwischen Heizplatte und Probekörper bzw. Kühlplatte und Probekörper. Bei den Wärmestrommessplatten handelt es sich um das Modell FQA019C (Wärmeflussplatte Typ 119) des Herstellers (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH 2019) Holzkirchen. Sie haben die Abmessungen (L x B x H) 250 mm x 250 mm x 1,5 mm. Die Messunsicherheit wird vom Hersteller mit 5 % angegeben. Um den Einfluss der Randeffekte zu kompensieren, ist der mittige Messausschnitt von einem 125 mm messenden umlaufenden Schutzring umgeben. Die Heizplatte besteht aus einer Aluminiumplatte mit den Abmessungen (L x B x H) 500 mm x 500 mm x 26 mm. In die Heizplatte sind auf der dem

Probekörper abgewandten Seite im Abstand von 31,25 mm Nuten eingelassen, in denen ein Heizdraht eingelegt ist. Siehe Abbildung 11.2. Die maximale thermische Leistung der Heizplatte beträgt 1100 W.



Abbildung 11.2: Aluminium-Heizplatte mit rückseitig eingefrästen Nuten und eingelegtem Heizdraht mit einer gesamt Heizleistung von 1100 W

Um die hohe Anforderung der Prüfnorm an die Regelabweichung bei der Temperaturregelung der Heizplatte zu erfüllen, wird diese als PID-Regel-Algorithmus implementiert. Abbildung 11.3 zeigt die Hardwarekomponenten des PID-Reglers. Für die Umsetzung wird das open-source-Microcontroller-System von Tinkerforge eingesetzt (Tinkerforge GmbH).

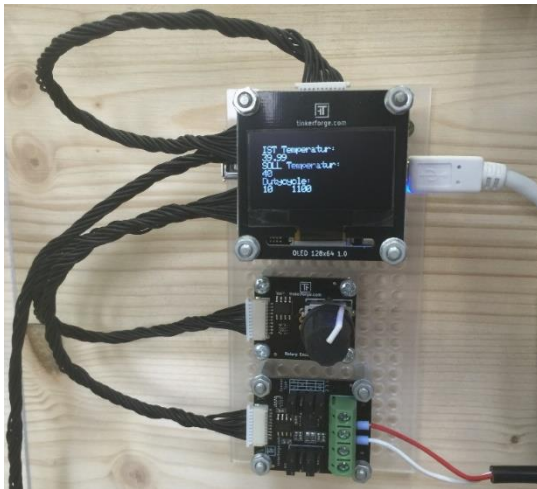


Abbildung 11.3: PID-Temperaturregelung auf der Basis des modularen open source Microcontrollersystems von (Tinkerforge GmbH)

In Abbildung 11.4 ist der Gesamtaufbau in geöffnetem Zustand dargestellt.

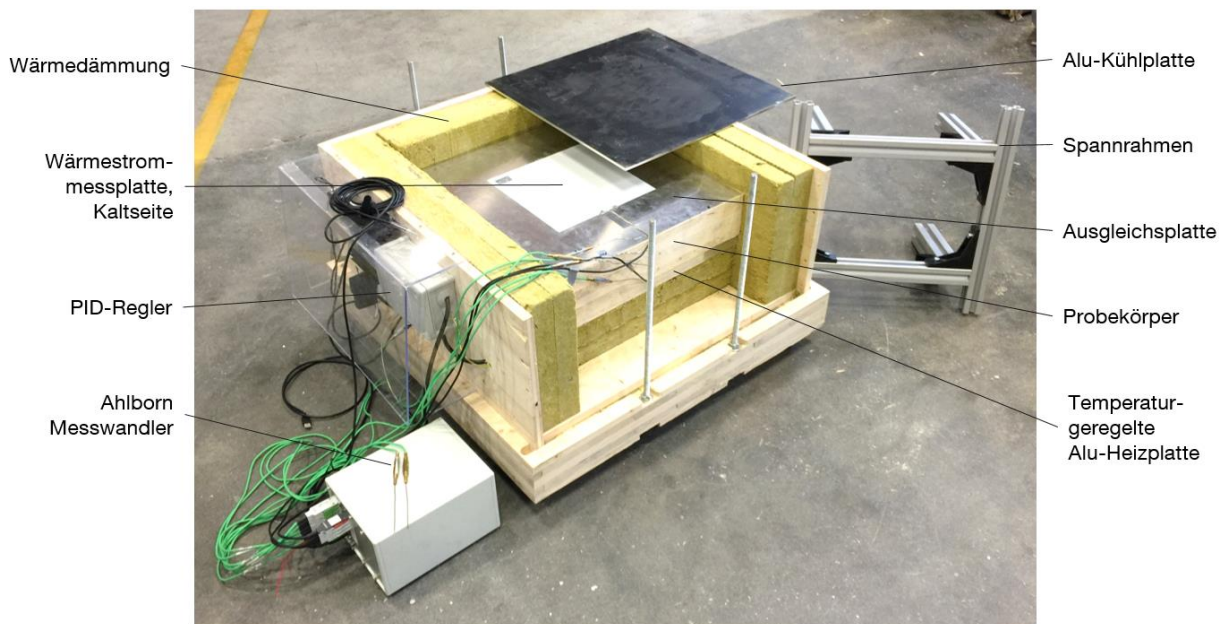


Abbildung 11.4: Prüfgerät für die Wärmeleitfähigkeit in geöffnetem Zustand

Auf fünf Seiten ist das Paket aus Heiz-, Kühl-, Messplatten und Probekörper umgeben von einer 100 mm starken Wärmedämmschicht aus Mineralwolle mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Die Oberseite der Kühlplatte bleibt ungedämmt. Zur Einfassung ist der gesamte Aufbau von einem Holzrahmen umgeben. Mit Hilfe von an der Grundplatte befestigten Gewindestangen und eines Spannrahmens aus Aluminiumsystemprofilen kann der Versuchsaufbau zusammenge-spannt werden. Der Aufbau wurde mittels Thermographie-Aufnahmen geprüft. Die Temperatur auf

der Oberfläche des Prüfkörpers erwies sich dabei als gleichmäßig und die Dämmschicht als frei von Leckagen.

Eine Abweichung von dem in der Norm beschriebenen Aufbau stellt die Kaltseite des Gerätes dar. Während die Prüfnorm eine aktiv temperierte Kühlplatte vorsieht, besteht in dem realisierten Wärmestrommessplattengerät die Kaltseite aus einer Aluminiumkühlplatte mit den Abmessungen (L x B x H) 500 mm x 500 mm x 6 mm, welche die aufgenommene Wärme passiv an das geregelte Umgebungsklima weiterleitet. Zur Erhöhung der Wärmeabgabe wurde dieser auf der exponierten Seite geschwärzt. Durch den Einsatz dezidierter Sensorik ist der Effekt dieser Abweichung hinreichend genau quantifizierbar und somit als transparent anzusehen. Die übrigen Eigenschaften des Versuchsaufbaus sowie der Versuchsaufbau entsprechen dem in der benannten Prüfnorm beschriebenen Verfahren.

Anhang B

Datenpunktliste zu den experimentellen Untersuchungen an den thermisch aktivierten Massivholzelementen							
Datenpunkt	Messgröße	Bauteil	Position	Messintervall	Messwertbereich	Auflösung	Ungenauigkeit
DP0	Bauteiltemperatur	Steg 5, mittlere Höhe	Oberfläche Schicht 1	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP1	Bauteiltemperatur	Steg 5, mittlere Höhe	Schichtgrenze 1-2	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP2	Bauteiltemperatur	Steg 5, mittlere Höhe	Schichtgrenze 2-3	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP3	Bauteiltemperatur	Steg 5, mittlere Höhe	Schichtgrenze 3-4	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP4	Bauteiltemperatur	Steg 5, mittlere Höhe	Schichtgrenze 4-5	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP5	Bauteiltemperatur	Steg 5, mittlere Höhe	Oberfläche Schicht 5	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP6	Lufttemperatur	Einströmöffnung	Rohrmitte	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP7	Lufttemperatur	Kanal 4, unten am Eingang	Mittig im Kanal	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP8	Lufttemperatur	Kanal 4, mittlere Höhe	Mittig im Kanal	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP9	Lufttemperatur	Kanal 4, oben am Ausgang	Mittig im Kanal	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP1z	Lufttemperatur	Sammel-/Verteilkanal	oben, mittig	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP11	Lufttemperatur	Ausströmöffnung	Rohrmitte	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP12	Lufttemperatur	zw. Kühl- und Heizregister	mittig	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP13	Wassertemperatur	Wärmetauscher	Vorlauf	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP14	Wassertemperatur	Speichertank	mittig	5 Minuten	-246 < T < 849°C	0,01K	0,3 K + 0,005*T
DP2z	relative Luftfeuchte	Ausströmöffnung	Rohrmitte	5 Minuten	5 < φ < 95 %	0,1 % r. F.	+/- 2 % r. F.
DP21	relative Luftfeuchte	Einströmöffnung	Rohrmitte	5 Minuten	5 < φ < 95 %	0,1 % r. F.	+/- 2 % r. F.
DP42	Wärmeflussdichte	Steg 5, mittlere Höhe	Oberfläche Schicht 1	5 Minuten	- 150 < q < 150	0,01 W/m²	+/- 5 %
DP43	Wärmeflussdichte	Steg 11, mittlere Höhe	Oberfläche Schicht 1	5 Minuten	- 150 < q < 150	0,01 W/m²	+/- 5 %
u15	Holzfeuchte	Steg 5, mittlere Höhe	15 mm	5 Minuten	(0) 6 < u < 90 %	0,10%	+/- 2 % HF
u25	Holzfeuchte	Steg 5, mittlere Höhe	25 mm	5 Minuten	(0) 6 < u < 90 %	0,10%	+/- 2 % HF
u40	Holzfeuchte	Steg 5, mittlere Höhe	40 mm	5 Minuten	(0) 6 < u < 90 %	0,10%	+/- 2 % HF
u70	Holzfeuchte	Steg 5, mittlere Höhe	70 mm	5 Minuten	(0) 6 < u < 90 %	0,10%	+/- 2 % HF

Anhang C: Bestimmung der Holzfeuchte an Prototyp A

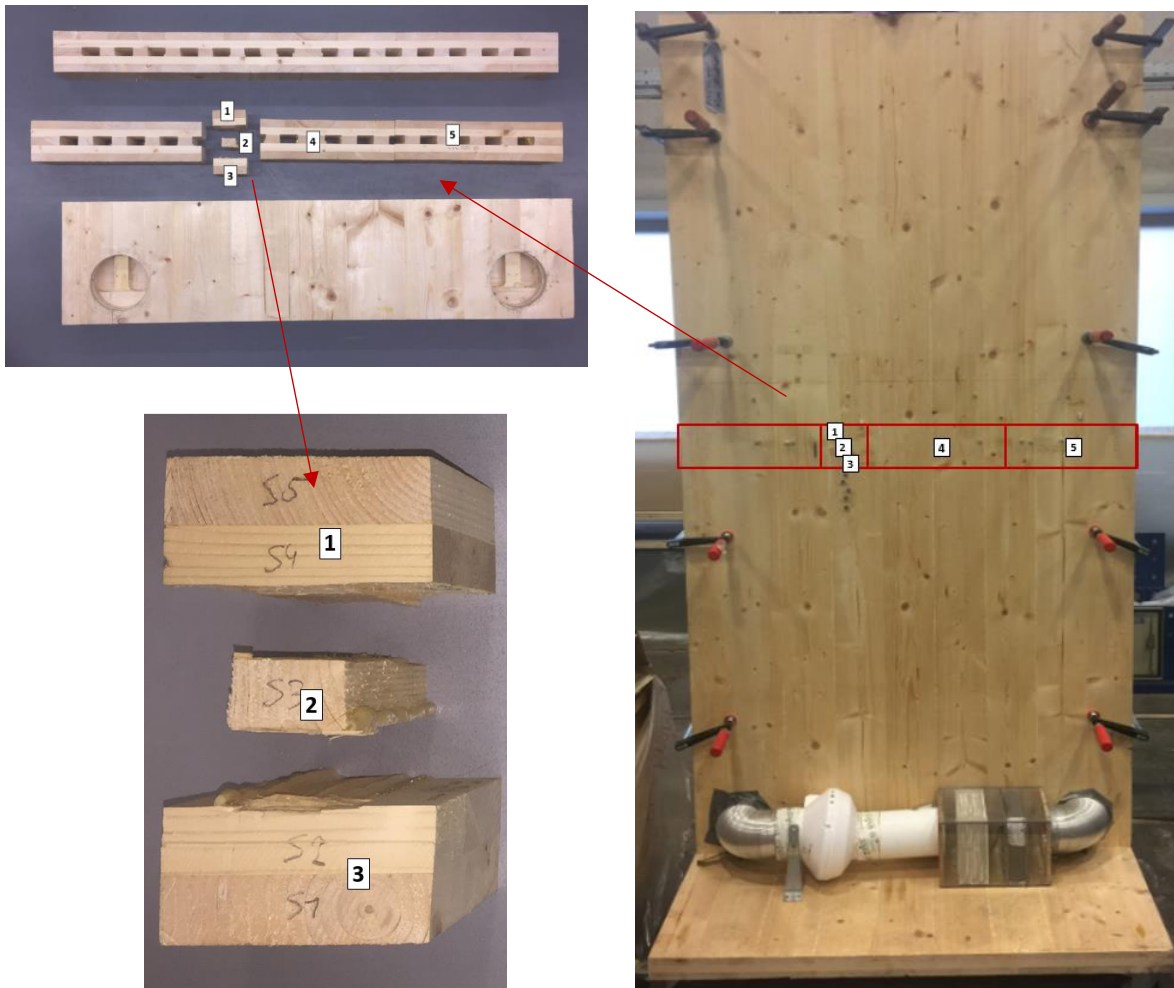


Abbildung 11.5: Probeentnahme nach dem Test des Prototyp A zur Bestimmung der Holzfeuchte und Begutachtung der Kanalinnenseiten

Die visuelle Untersuchung am Prototyp A ergab, dass nach mehrwöchigem Heizbetrieb keine Schwindrisse an der Elementoberfläche aufgetreten sind. Hieraus lässt sich allerdings nur bedingt eine allgemeingültige Bewertung der Problematik des Quell- und Schwindverhaltens ableiten.

Tabelle 11-1: Materialfeuchtemessung nach Ende des Heizbetriebes an Prototyp A

Darrtrocknung Prototyp A		03.11.; 13:00	10.11.2017; 14:00	10.11.2017; 18:00	03.11.; 13:00
		Masse Feucht mu	Masse darrtrocken		Wassergehalt u
Probe	aus Position	[g]	mt_1 [g]	mt_2 [g]	[%]
1	Mittlere Höhe, Steg 6, Schichten 4-5	133,12	125,89	125,89	5,74%
2	Mittlere Höhe, Steg 6, Schicht 3	27,6	26,2	26,2	5,34%
3	Mittlere Höhe, Steg 6, Schichten 1-2	150,63	139,6	139,6	7,90%
4	Mittlere Höhe, Steg 7-10, Schichten 1-5	1304,41	1218,09	1218,09	7,09%
5	Mittlere Höhe, Steg 11-15, Schichten 1-5	1578,35	1463,3	1463,3	7,86%

Anhang D: Orientierungswerten der Qualitätsanforderungen an die thermische Gebäudehülle

Tabelle 11-2: Modell-Eingangsdaten im Vergleich zu den Orientierungswerten der Qualitätsanforderungen an die Gebäudehülle; in Anlehnung an (Vitopoulou 2018)

Parameter	Einheiten	Modell-Kennwerte	Referentenentwurf des GEG Referenzwerte für NWG-Neubau	KfW-Effizienzhaus 55 Referenzwerte für NWG-Neubau	Minergie-P in der Schweiz äquivalent NZEB umfasst alle Gebäudekategorien	KfW-Effizienzhaus 55 Referenzwerte WG-Neubau	Lt. OÖ Energiesparverband WG-Neubau
Außenwände Geschossdecken nach unten gegen Außenluft	W/m²K	0.197				$U \leq 0.2$	$U \leq 0.16$
Dachflächen oberste Geschossdecke Dachgauben	W/m²K	0.141	$\bar{U}_{\text{opak}} \leq 0.25$	$\bar{U}_{\text{opak}} \leq 0.22$		$U \leq 0.14$	$U_{\text{DG}} \leq 0.12$
Sonstige opake Bauteile (Kellerdecken Wände und Decken zu unbeheizten Räumen Wand Boden gegen Erdreich)	W/m²K	0.366				$U \leq 0.25$	$U_{\text{KD}} \leq 0.20$
Fenster und sonstige transparente Bauteile	W/m²K	0.59			$\bar{U}_{\text{transparent}} \leq 1.3$ $\bar{U}_{\text{Vorhang}} \leq 1.3$	$\bar{U}_{\text{transparent}} \leq 1.20$ $\bar{U}_{\text{Vorhang}} \leq 1.20$	$U_w \leq 1.0$
		g-Wert [-]	0.402	0.48	-	-	-
		t-Wert [-]	0.67	0.72	-	-	-
Wärmebrücken	W/m²K	-	Vermeidung von Wärmebrücken nach § 13	wärmebrücken-minimierte Ausführung	Minimierte Wärmebrücken	Vermeidung von Wärmebrücken: $\Delta U_{\text{WB}} \leq 0,035$	Vermeidung von Wärmebrücken
Gebäudedichtigkeit	1/h	0,18	$n_{50} \leq 1.5$ Kategorie I nach DIN V 18599-2: 2016-10 Tabelle 7	luftdicht ausgeführte Gebäudehülle	$n_{50} \leq 0.6$	$n_{50} \leq 0.7$ standardmäßig $n_{50} \leq 0.6$ bei nach Anlage 4EnEV erfdl. Luftdichtheit	$n_{50} \leq 1$
Wärmerückgewinnung	%	75	WRG mindestens 70	Lüftungsanlage mit WRG	Lüftungsanlage mit WRG	Rückwärmzahl mindestens 70	≥ 80
Quelle		(Bastian et al. 2018: 70)	(BMW; BMUB 2019)	(KfW Bankengruppe 2018a: 1)	Auszüge von der Internetseite: http://www.minergie.ch/	(KfW Bankengruppe 2018b: 2 f.)	(Armbruster et al. 2011: 2) nach OÖ It., BAU.GENIAL, Passivhausinstitut Darmstadt

