



Projektarbeit HS 2012

Messung der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität von Holzfaserdämmplatten

MATTHIAS WAGNER

(3. Master-Semester Bauingenieurwissenschaften)

Leiter: Prof. Dr. P. Niemz

Betreuer: Dr. S. Clauß

F. Michel

ABSTRACT

Rund 40% des jährlichen Energieverbrauchs in der Schweiz wird zur Beheizung und Kühlung der rund zwei Millionen Gebäude eingesetzt. Es ist darum wenig erstaunlich, dass der Gebäudesektor mit rund 40% der CO₂-Emissionen wesentlich zur Klimaerwärmung beiträgt, da für die Wärmeproduktion immer noch fossile Brennstoffe wie Öl oder Gas eingesetzt werden. Ein möglicher Ansatz zur Reduzierung dieser umweltschädlichen Emissionen ist die Substitution der fossilen Brennstoffe für den Betrieb von Gebäuden durch umweltfreundlichere Energieträger. Da diese Substitution jedoch aus verschiedenen Gründen nicht einfach umzusetzen ist, wird zur Reduktion des Energieverbrauchs aufgerufen. Ein probates Mittel zur Energiereduktion ist die energetische Sanierung des gesamten Gebäudebestands durch den Einsatz von Dämmstoffen.

Bedingt durch die immer schärfer werden Energievorschriften bezüglich der Dämmung von Aussenhüllflächen und dem stattfindendem Umdenken in der Bevölkerung bezüglich dem nachhaltigem und ökologischem Bauen, hat sich der Dämmstoffmarkt in den letzten Jahren zu einem grossen Geschäft entwickelt. Obwohl Dämmstoffe auf Holzbasis wie z.B. Holzfaserdämmplatten (noch) nicht mit den grossen Playern des Dämmstoffmarktes, den Mineralfaser- oder Polystyroldämmstoffproduzenten, mithalten können, ist ein Aufwärtstrend in der Produktion ersichtlich. Um diesen Aufwärtstrend weiter zu unterstützen, wird von Seiten der Holzfaserdämmstoffindustrie viel Kapital in neue Produktionsanlagen investiert, um den zukünftigen Bedarf decken zu können, aber auch um die Weiterentwicklung ihrer Produkte zu fördern.

Einen kleinen Beitrag zur Weiterentwicklung von Holzfaserdämmplatten sollte mit der vorliegenden Arbeit geleistet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, welchen Einfluss der Anpressdruck sowie der Messmodus auf die Messung der Wärmleitfähigkeit von Holzfaserdämmplatten haben. Es konnte gezeigt werden, dass mit steigendem Anpressdruck die Wärmeleitfähigkeit abnimmt. Da dies nicht mit dem allgemeinen Verhalten von Dämmstoffen übereinstimmt, dass mit steigender Dichte die Wärmeleitfähigkeit zu nimmt, muss vermutet werden, dass verfahrensbedingte Faktoren die Resultate beeinflussten. So ist anzunehmen, dass bei geringem Druck erhöhte Verluste im Messgerät auftraten. Es wird somit empfohlen, die zukünftigen Messungen immer mit dem maximal möglichen Druck durchzuführen.

Aus den Untersuchungen des Einflusses der Messmethode auf die Wärmeleitfähigkeit konnte die Temperaturabhängigkeit des Holzwerkstoffes aufgezeigt werden. Zudem wurde gezeigt, dass bei Mehrfachmessungen die vorgängige Messtemperatur einen Einfluss auf die Wärmleitfähigkeit hat.

Weiter wurden in dieser Arbeit zwei verschiedene Verfahren zur Messung der spezifischen Wärmekapazität von Holzfaserdämmplatten mit dem Differenztemperaturverfahren entwickelt und getestet. Die hohen Nennwerte der spezifischen Wärmekapazität aus den Produktdatenblättern der Holzfaserdämmplattenhersteller konnten nicht nachgewiesen werden. Die gemessen Werte der spezifischen Wärmekapazität haben sich jedoch nicht schlecht im Bereich verschiedenster Literaturwerte bewegt.

INHALTSVERZEICHNIS

Αl	ostract .	•••••		iii
In	haltsve	rzeicl	hnis	v
V	orwort .			.vii
1	Einl	eitun	g	1
	1.1	Ausg	gangslage	1
	1.2	Ziels	etzung	1
2	Ken	ntnis	stand	2
	2.1	Grur	ndlagen zu Wärmedämmung	2
	2.2	Holz	faserdämmplatten	3
	2.2.	1	Herstellung von Holzfaserdämmplatten	3
	2.2.	2	Inhaltsstoffe	6
	2.2.	3	Produkteigenschaften und Anforderungen	7
	2.2.	4	Anwendungen	8
	2.3	Grur	ndlagen des Wärmetransports	9
	2.3.	1	Bauphysikalische Kenngrössen	9
	2.3.	2	Instationäre Wärmeleitung	14
	2.3.	3	Stationäre, eindimensionale Wärmeleitung	16
	2.4	Wär	meleitung in Holzfaserdämmplatten	17
	2.4.	1	Wärmeleitfähigkeit	17
	2.4.	2	Spezifische Wärmekapazität	18
	2.5	Best	immung der spezifischen Wärmekapazität	21
3	Mat	terial	und Methoden	22
	3.1	Wär	meleitfähigkeitsmessung	22
	3.1.	1	Einfluss des Anpressdruck	24
	3.1.	2	Einfluss der Messmethode	24
	3.2	Wär	mekapazitätsmessung	25
4	Erge	ebnis	se und Disskusion	27
	4.1	Wär	meleitfähigkeitsmessung	27
	4.1.	1	Einfluss des Anpressdruck	27
	4.1.	2	Einfluss der Messmethode	29
	4.2	Wär	mekapazitätsmessung von Holzfaserdämmplatten	32
	4.2.	1	Messresultate	32
	4.2.	2	Vergleich der Messresultate mit Literaturwerten	37
	4.2.	3	Vergleich der Versuchsaufbauten	38
	4.2.	4	Empfehlungen für den Versuchsaufbau	39
5	Zusa	amm	enfassung und Aussicht	40
Li	teratur	verze	ichnis	41

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Master-Projektarbeit im dritten Mastersemester des Bauingenieurstudiengangs an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETH Zürich).

Motiviert durch verschiedene Vorlesungen des Bachelor- und Masterstudiengangs zum Thema Holz und Holzwerkstoffe, wählte ich für meine zweite Master-Projektarbeit eine Arbeit in der Arbeitsgruppe Holzphysik des Instituts für Baustoffe der ETH Zürich. Mit dieser Arbeit wollte ich mich noch intensiver mit dem Baustoff Holz und seinen Eigenschaften auseinandersetzen. Zudem war es mir wichtig, neben dem theoretischen Wissen auch Praxiserfahrungen im Labor und einen Einblick in die Forschung des natürlichen und nachwachsenden Baumaterials Holz zu erlangen.

Unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Peter Niemz und den beiden Betreuern Dr. Sebastian Clauss und Franco Michel durfte ich in den Laborräumen der Arbeitsgruppe für Holzphysik drei tolle und lehrreiche Monate erleben. Besten Dank für die freundliche und geduldige Zusammenarbeit. Einen weiteren Dank möchte ich Thomas Schnider, dem Laborchef der Arbeitsgruppe, für die vielen hilfreichen Tipps aussprechen.

Zum Schluss möchte ich meiner Familie, allen Freunden und meiner Lebenspartnerin danken, die mich während dieser Arbeit mit viel Verständnis und zahlreichen Hinweisen unterstützt haben.

1 EINLEITUNG

1.1 AUSGANGSLAGE

Getrieben durch die Klimaerwärmung und die immer steigenden Rohölpreisen hat in den letzten Jahrzehnten ein Umdenken in der Bevölkerung bzw. der Regierung bezüglich des Energieverbrauchs stattgefunden. Schlagwörter wie "nachhaltiges Bauen" und "Energieeffizienz" sind heutzutage in aller Munde. Es wurde erkannt, dass eine Reduzierung von Emissionen und damit auch des Energieverbrauchs von Gebäuden dringend notwendig ist.

Einen wesentlichen Beitrag zum "nachhaltigen Bauen" bzw. der Reduzierung des Energieverbrauchs leistet die Wärmedämmung der Gebäudehülle. Durch die Wärmedämmung kann der Verbrauch von fossilen Brennstoffen zum Heizen, welche rund 40% des jährlichen Energiebedarfs ausmachen, stark reduziert werden.

Die Holzfaserdämmplatten spielen im stark wachsenden Dämmstoffmarkt der letzten Jahre jedoch eine Nebenrolle. Der Markt wird mit Marktanteilen von rund 60% bzw. 30% von den Mineralfaserdämmstoffen und Polystyrol-Dämmstoffen EPS/XPS dominiert. Polyurethanschäume (PUR) besitzen einen Marktanteil von ca. 5%. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, wie z.B. Zellulose oder Holzfaserdämmplatten haben sich seit Mitte der 90er Jahre einen geringen aber relativ stabilen Marktanteil von rund 4% erobert. Sonstige Dämmstoffe (z. B. Perlite, Blähton und Schaumglas) erreichen seit Jahren etwa 1% Markanteil (vgl. [1]).

Durch die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und den hervorragenden ökologischen und bauphysikalischen Eigenschaften der Naturfaserdämmstoffe, wie z.B. den Holzfaserdämmplatten, wird diesem Dämmstoff noch ein grosses Potential zur Marktstärkung zugesprochen. Momentan sind die Naturfaserdämmstoffe noch weit unterrepräsentiert. Durch Weiterentwicklung der wesentlichen Eigenschaften, wie der Wärmeleitung oder der Wärmespeicherung, kann die Marktakzeptanz gestärkt und den anderen Dämmstoffen Markanteile entzogen werden.

1.2 ZIELSETZUNG

Das Ziel dieser Projektarbeit ist es, die Prüfmethodik zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmplatten hinsichtlich des Einflusses des Anpressdrucks des Messgeräts und des Einflusses der Messmethode zu untersuchen. Des weiteren soll ein geeigneter Versuchsaufbau zur Bestimmung der spezifischen Wärmespeicherkapazität von Holzfaserdämmplatten realisiert und getestet werden.

2 KENNTNISSTAND

2.1 GRUNDLAGEN ZU WÄRMEDÄMMUNG

Als Wärmedämmung im Bauwesen, umgangssprachlich auch Isolierung oder Wärmeisolierung genannt, werden Baustoffe bezeichnet, welche den Durchgang von Wärmeenergie durch die Gebäudehülle oder Bauteile reduzieren, um einen Bereich vor der Abkühlung oder der Erwärmung zu schützen. In der DIN 4108 wird definiert, dass nur Baustoffe, welche eine Wärmeleitfähigkeit von kleiner als 0.1 W/(m·K) aufweisen, als Wärmedämmstoffe bezeichnet werden dürfen.

Eine übliche Einteilung der Dämmstoffe erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Rohstoffbasis in Dämmstoffen aus anorganischen/mineralischen oder organischen Rohstoffen. Eine weitere Unterteilung der Dämmstoffe wird in Bezug auf die Herstellung des Rohstoffs vorgenommen. Sowohl anorganische/mineralische als auch organische Dämmstoffe können aus natürlich oder synthetisch hergestellten Rohstoffen bestehen. In Abbildung 2.1 ist die Einteilung der Dämmstoffe auf Basis der Rohstoffe mit den bekanntesten Materialien dargestellt.

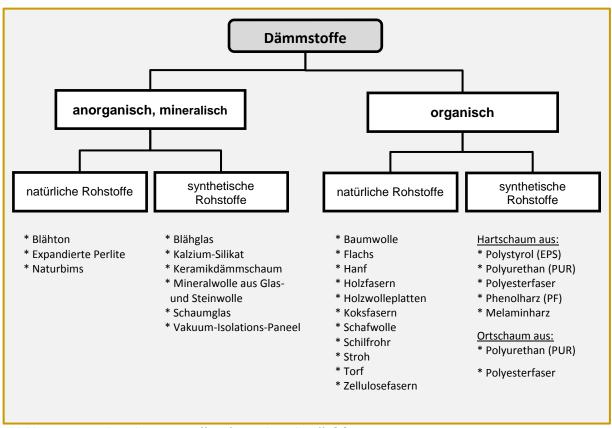


Abbildung 2.1: Einteilung der Dämmstoffe auf Basis der Rohstoffe [1]

Eine weitere Möglichkeit die Dämmstoffe einzuteilen, ist die Klassifizierung nach dem strukturellen Aufbau. Dabei wird in Faserdämmstoffe, geschäumte Dämmstoffe und Granulate/Schüttungen unterschieden.

2.2 HOLZFASERDÄMMPLATTEN

Holzfaserdämmplatten sind werkmässig hergestellte, plattenförmige Holzfaserdämmstoffe, welche gemäss der Definition der DIN EN 13171 einen Massenanteil von mindestens 80% Holzfasern enthalten müssen. Oftmals werden sie aus lokalen Sägewerkresthölzern wie z.B. Schwarten, Spreisseln oder Hackschnitzel hergestellt, die anderweitig nur noch schwer einsetzbar und als nachwachsender Rohstoff ausreichend vorhanden sind. Mit dem lokalen Bezug des Rohstoffs kann der Transportaufwand zum Herstellwerk minimiert und somit die Ökologie des Baustoffs verbessert werden.

Die am meisten verwendeten Holzarten zur Produktion von Holzfaserdämmstoffen sind die Nadelbäume Fichte, Tanne und Kiefer [2]. Neben der besseren Verfügbarkeit dieser Holzarten haben Nadelbäume gegenüber den Laubbäumen den Vorteil, dass sie längere Holzfasern besitzen. Lange Holzfasern eignen sich besser zur Produktion von Holzfaserdämmstoffen, da sie den Platten im Verhältnis zur Rohdichte eine höhere Festigkeit verleihen, als die kurzfaserigen Holzfasern der Laubbäume. Die Rohdichte der Dämmaterialien sollen so gering wie möglich gehalten werden, um die bauphysikalische Eigenschaften wie z.B. die Wärmeleitfähigkeit nicht nachteilig zu beeinflussen (vgl. dazu Kapitel 2.3.1 und Kapitel 2.4).

2.2.1 HERSTELLUNG VON HOLZFASERDÄMMPLATTEN

Die Herstellung der Holzfaserdämmplatten erfolgt in drei Arbeitsgängen. Im ersten Schritt wird das Rohmaterial, meist Schwarten oder sonstige Holzrestprodukte zu Hackschnitzeln weiterverarbeitet. Die Hackschnitzel werden folgend zu Holzfasern bzw. Holzfaserbündeln, dem eigentlichen Rohstoff der Holzfaserdämmplatte, verarbeitet. Im letzten Arbeitsgang folgt die Produktion der Holzfaserdämmplatten entweder mittels dem älteren Nassverfahren oder dem neueren Trockenverfahren.



Abbildung 2.2: Weg vom Rohstoff hin zum Dämmstoff [3]

Zerfaserung

Zur Aufbereitung des Faserrohstoffs für die Holzfaserdämmplattenherstellung werden unterschiedliche industrielle Zerfaserungsverfahren verwendet. Alle Verfahren haben gemeinsam, dass sie versuchen, das Ausgansmaterial möglichst schonend aufzuscheren und die einzelnen Fasern aus dem Faserverband herauszulösen.

Der allgemeine Verfahrensablauf der Zerfaserung ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Die Hackschnitzel werden vorgängig mit Rüttelsieben und Magneten von Fremdpartikeln befreit. Um den mechanischen Aufschluss des Holzgefüges zu erleichtern, werden hauptsächlich thermo-mechanische Verfahren verwendet. Dabei wird mittels einer hydromechanischen Vorbehandlung das Lignin, welches in der Mittellamelle als Kitsubstanz des Zellverbunds wirkt, erweicht. Die eigentliche Defibrierung in Fasern bzw. des Faserbündels erfolgt mechanisch mittels Zerfaserungsaggregaten, sogenannten Refinern. Das aufgeweichte Holzfgefüge wird dabei zwischen zwei Scheiben, von denen eine feststeht und eine rotiert, in die einzelnen Fasern bzw. Faserbündeln abgeschert, geschnitten und abgerieben.

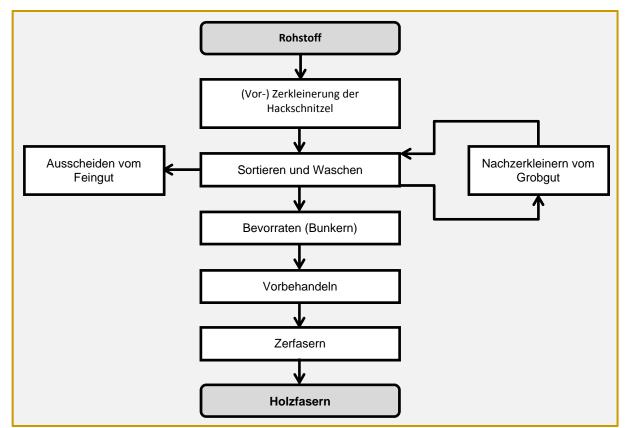


Abbildung 2.3: Verfahrensablauf der Zerfaserung von Holzreststoffe

Für den Aufschluss des Holzes dominieren international in der Faserplattenindustrie drei thermomechanische Verfahren:

- Dampfexplosionsverfahren nach MASON
- Defibratorverfahren nach SPLUND
- Bauer-Verfahren nach BAUER

Die drei Verfahren zur Faserstofferzeugung, deren Grundlagen im Zeitraum von 1924 bis 1937 erarbeitet wurden, sind in [4] ausführlich beschrieben.

Nassverfahren

Die ersten Holzfaserplatten im Nassverfahren wurden im Jahr 1926, als eines der ersten Holzwerkstoffe, industriell hergestellt. Die Erfindung eines ökonomischen und industriell einsetzbaren Verfahrens der Holzzerfaserung ermöglichte die Holzfaserplattenherstellung. Durch die guten Eigenschaften und der Möglichkeit zur grossformatigen Produktion wurden diese Holzwerkstoffe rasch weiterentwickelt.

Im Nassverfahren der Holzfaserdämmplatten-Herstellung, in Abbildung 2.4 grafisch dargestellt, werden die Fasern nach der Zerfaserung mit Wasser und diversen Inhaltsstoffen zu einem Faserbrei (Suspension) aufgeschwemmt. Durch die kontinuierliche Sedimentation der Fasern aus der Suspension mit bis zu 98% Wasser erfolgt eine Faservliesbildung auf der Formmaschine mit umlaufendem Fliessband.

Durch freies Ablaufen und mechanischem Auspressen wird der Wassergehalt des Faserkuchens möglichst stark reduziert, um die Energiekosten der Trocknung mittels Trockenkanal zu reduzieren. Anschliessend wird der fortlaufende Faserkuchen in kleinere Einheiten zugeschnitten, damit das Faservlies in einem Trockenkanal bei Temperaturen von 160°C bis 220°C getrocknet werden kann. Bei dieser Trocknung kommt es durch die holzeigenen Bindungskräfte des Lignins, welche durch die thermo-mechanische Zerfaserung und dem Wasser aktiviert werden, zu einem Abbindungsprozess

und somit zu einer Erhärtung des Faservlieses. Eine Beigabe von Klebstoffen ist im Nassverfahren aufgrund der Aktivierung der eigenen Bindungskräfte nicht unbedingt nötig. Trotzdem werden oft Harze oder bitumenhaltige Zusatzmittel dem Prozesswasser beigefügt, um die Produkteigenschaften (z.B. Festigkeit, Feuchtebeständigkeit) gezielt verbessern zu können.

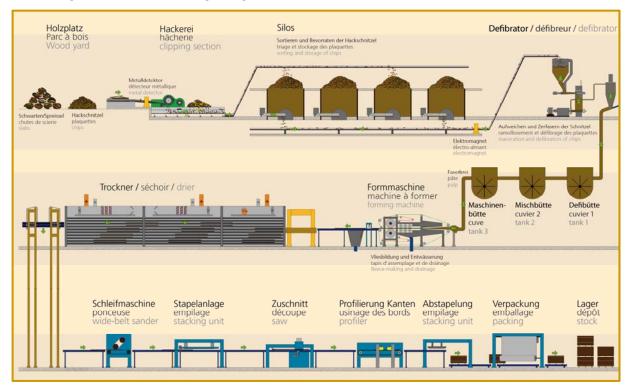


Abbildung 2.4: Verfahrensablauf des Nassverfahrens (mit Zerfaserung) zur Herstellung von Holzfaserdämmplatten [5]

Nach der Trocknung werden die Faservliese auf der Oberfläche geschliffen und in das gewünschte Format zugeschnitten. Da mit dem Nassverfahren produktionsbedingt nur Plattendicken von 3-32 mm hergestellt werden können, werden die Dämmplatten für grössere Dicken schichtverklebt. Die Rohdichten der Holzfaserdämmplatten des Nassverfahrens können durch unterschiedlich starkes Auspressen des Prozesswassers zwischen 100-300 kg/m³ variiert werden.

Trockenverfahren

Die thermo-mechanisch behandelten Holzfasern werden direkt nach der Zerfaserung auf die für den Beleimungsprozess benötigte Restfeuchte getrocknet. Im Beleimungskanal oder –turm werden die Fasern mit Bindemittel beleimt und anschliessend auf einem umlaufenden Förderband ausgestreut. Die gewünschte Plattendicke der ausgestreuten und beleimten Fasern können durch mechanisches Pressen eingestellt werden. Nach dem neusten Stand der Technik könne heutzutage homogene, einschichtige Dämmplatten von bis zu 240 mm Dicke im Trockenverfahren hergestellt werden. Die Stabilisierung der Form des Faserkuchens erfolgt durch ein Dampf-Luft-Gemisch, welches das Bindemittel aushärten lässt.

Mit dem Trockenverfahren ist auch die Herstellung von flexiblen Holzfaserdämmplatten möglich. Dazu werden die Holzfasern nach der Trocknung mit textilen Bindefasern gemischt. Die Fasermischung wird anschliessend über eine Formstrasse zu einem endlosen Strang geformt und mittels eines Förderbands einem Durchströmungstrockner zugeführt. Der Durchströmungstrockner lässt die Bindefasern partiell aufschmelzen, damit während der Trocknung und Abkühlung des Strangs eine Vernetzung der Fasern stattfinden kann. Der Plattenstrang kann am Ende des Herstellungsprozesses in beliebige Plattenformate zugeschnitten werden. Der anfallende Fräs- und Sägestaub wird in den Produktionsablauf zurückgeführt.

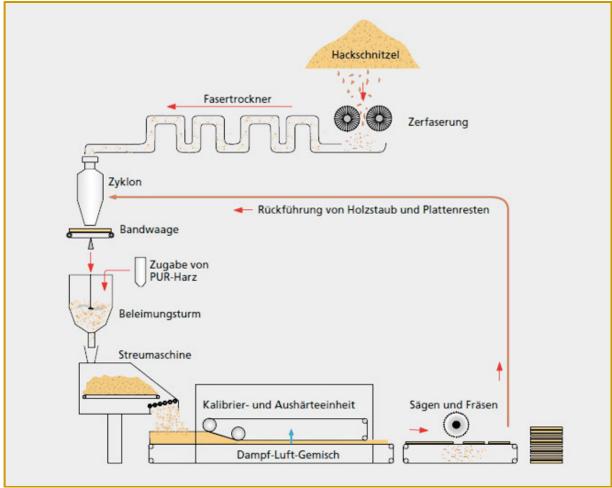


Abbildung 2.5: Verfahrensablauf des Trockenverfahrens zur Herstellung von Holzfaserdämmplatten [3]

Das Trockenverfahren zeichnet sich gegenüber dem älteren Nassverfahren dadurch aus, dass homogene und viel dickere einschichtigen Holzfaserdämmplatten produziert werden können. Weiter hat das Verfahren den Vorteil, dass höhere Festigkeit bei geringerer Rohdichte erreicht werden. Der Herstellungsprozess weist zudem geringere Masstoleranzen und einen um ca. 40% reduzierten Energiebedarf auf, da keine Ofentrocknung der Holzfaserdämmplatten mehr vorgenommen werden müssen.

2.2.2 INHALTSSTOFFE

Den Holzfaserdämmplatten werden den Holzfasern, je nach Herstellungsverfahren unterschiedliche Mengen von Zusatzstoffen, wie

- Bindemittel,
- Hydrophobierungsmittel,
- Holzschutzmittel oder
- feuerhemmende Zusatzstoffen

beigefügt. Durch diese Zusatzstoffe können die diversen Produkteigenschaften im Herstellungsprozess gezielt modifiziert und verbessert werden.

Den im Nassverfahren produzierten Holzfaserdämmplatten werden keine oder nur geringe Mengen (ca. 1-3%) an Bindemitteln wie z.B. Phenolharze eingesetzt, da die Bindung der Holzfasern durch die Verfilzung der Fasern sowie der eigenen Verklebungsfähigkeit mittels Ligninen erfolgt. Zur Verbesserung der Verfilzung der Fasern kann ca. 1% Aluminiumsulfat den Holzfasern beigegeben werden. Das Aluminiumsulfat bewirkt eine bessere Aktivierung der Verklebungseigenschaften der Lignine in den Holzfasern. Beim Trockenverfahren muss durch die fehlende Verfilzung und Verklebungsfähigkeit der

Fasern, ein Bindemittel hinzugefügt werden. Häufig wird ca. 4% PUR-Harz als Bindemittel verwendet, jedoch können auch andere Bindemittel wie z.B. Melamin- oder Phenolharze eingesetzt werden.

Zur Verbesserung der Feuchtebeständigkeit der Holzfaserdämmplatten können Paraffine, Bitumen oder Latex als Hydrophobierungsmittel verwendet werden. Während die Paraffine, als übliches Hydrophobierungsmittel, in sehr geringen Mengen von ca. 0.4-2.0% den Holzfasern beigefügt werden, werden bitumen- oder latexbasierte Hydrophobierungsmittel in grösseren Anteilen von 10% bzw. 5% hinzugefügt.

2.2.3 PRODUKTEIGENSCHAFTEN UND ANFORDERUNGEN

Holzfaserdämmplatten werden schon seit über 60 Jahren im Bauwesen verwendet. Im Laufe der Zeit wurden neben den klassischen Anwendungsgebieten, wie z.B. als Dämmschicht unter Parkett oder der raumseitigen Bekleidung von Aussenwänden und Dachschrägen, weitere Anwendungsgebiete durch kontinuierliche Weiterentwicklung der Produkte und der Produktionsverfahren erschlossen. Die Ausdehnung der Anwendungsgebiete der Holzfaserdämmplatten im Bauwesen führte zu einer wesentlichen Vergrösserung des Faserplattensortiments. Heutzutage werden viele verschiedene Holzfaserdämmplatten mit unterschiedlichen Produkteigenschaften produziert. Für eine gezielte Ausschreibung der Dämmstoffe ist es somit unabdingbar, die benötigten Anforderungen an die Holzfaserdämmplatten zu kennen und auch klar zu deklarieren. Die Holzfaserdämmplatten müssen je nach Anwendung auf dem Bau folgende Anforderungen, im unterschiedlichen Mass, erfüllen:

- winterlicher und sommerlicher Wärmeschutz
- Schallschutz
- Brandschutz
- Bearbeitbarkeit/ Verarbeitbarkeit
- Ökologie (Umweltverträglichkeit, Recycelfähigkeit)

Winterlicher und sommerlicher Wärmeschutz

Der Mensch empfindet Raumtemperaturen von weniger als 19°C und mehr als 23°C nicht mehr zufriedenstellend behaglich. Darum sind die Räume im Winter vor dem Auskühlen und im Sommer vor dem Überhitzen zu schützen. Holzfaserdämmplatten besitzen eine niedrige Wärmeleitfähigkeit, ein hohes Wärmespeicherungsvermögen und eine relativ hohe Rohdichte. Durch die niedrige Wärmeleitfähigkeit bieten die Holzfaserdämmplatten einen guten winterlichen Kälteschutz und wirken dem Wärmeverlust bzw. dem Auskühlen der Wohnräume entgegen. Im Sommer schützen Holzfaserdämmplatten durch die hohe spezifische Wärmekapazität und der relativ hohen Rohdichte die Wohnräume vor Überhitzung, da sie den Wärmefluss von aussen ins Rauminnere stark dämpfen und zeitlich erheblich verzögern.

Schallschutz

Die poröse Faserstruktur und die hohe Rohdichte der Holzfaserdämmplatten sind ausschlaggebend für die guten schalldämmenden Eigenschaften.

Brandschutz

Holzfaserdämmplatten tragen im Brandfall nachweislich zum Feuerwiderstand der Bauteile bei, da an der Holzfaserdämmstoff-Oberfläche eine Ascheschicht entsteht, welche die Sauerstoffzufuhr und somit eine schnelle Brandausbreitung verringert. Da nur geringe Mengen an Zusätzen den Holzfaserdämmplatten, unteranderem Brandschutzmittel, beigefügt werden, werden keine giftigen Rauchgase freigesetzt. Gemäss DIN 4102 werden Holzfaserdämmstoffe hinsichtlich des Brandverhaltens wie gewachsenes Nadelholz als "normalentflammbar" eingestuft.

Bearbeitbarkeit/ Verarbeitbarkeit

Die Holzfaserdämmplatten können auf der Baustelle einfach mit hartmetallbestückten Holzbearbeitungswerkzeugen bearbeitet und zugschnitten werden. Holzfaserdämmplatten mit einer Rohdichte von mehr als 100 kg/m³ eignen sich zur Profilierung und können mit einer Nut- und Federverbindung bzw. einem Stufenfalz versehen werden. Ein schneller Einbau z.B. als Unterdeckplatte kann damit garantier werden.

Ökologie (Umweltverträglichkeit, Recycelfähigkeit)

Da Holzfaserdämmplatten fast ausschliesslich aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz hergestellt wird, weisen sie über den gesamten Lebenszyklus eine positive ökologische Bilanz auf. Bei den Herstellern von Holzfaserdämmplatten wird aus ökologischen und marketingtechnischen Gründen besonders darauf geachtet, dass der Rohstoff aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern stammt und die Produkte über anerkannte Zertifikate verfügen. Die meisten Holzfaserplatten sind zudem recycelfähig bzw. können kompostiert werden, sofern sie nicht durch Fremdstoffe wie z.B. Hydrophobierungsmittel kontaminiert sind.

2.2.4 ANWENDUNGEN

Holzfaserdämmstoffe bzw. Holzfaserdämmplatten können in allen Hochbauanwendungen verwendet werden, sofern sie nicht in Kontakt mit dem Erdreich kommen (Perimeterdämmung) oder als Dämmung oberhalb von Flachdachabdichtungen (Umkehrdächer) eingesetzt werden. Die Holzfaserdämmstoffe werden gemäss der DIN 4108-10 in 12 verschiedene Anwendungstypen eingeteilt, welche je nach Anwendungstyp differenzierte Produkteigenschaften aufweisen müssen. Zudem wird der Hersteller dazu verpflichtet, die Produkteigenschaften und der entsprechende Anwendungstyp klar auf dem Beipackzettel des Produkts zu deklarieren.

Anhand der sogenannten "Eigenschaftskurzzeichen" wird dabei in Wärmedämmstoffe mit keiner (dk), geringer (dg), mittlerer (dm), hoher (dh) oder sehr hoher (ds) Druckfestigkeit unterschieden. Bei den Trittschalldämmplatten (DES) wird zwischen Produkten mit erhöhter (sh) bzw. geringer (sg) Zusammendrückbarkeit unterschieden.

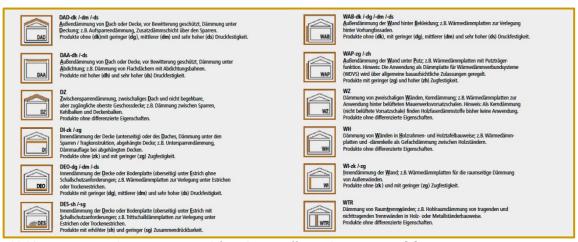


Abbildung 2.6: Anwendungstypen von Holzfaserdämmstoffen nach DIN 4108-10 [3]

2.3 GRUNDLAGEN DES WÄRMETRANSPORTS

Als Wärmetransport wird der Transport von thermischer Energie durch Festkörper, ruhende Flüssigkeit und ruhende Gase bezeichnet, welche infolge eines Temperaturunterschiedes über mindestens eine thermodynamische Systemgrenze hinweg erfolgt. Die transportierte Energie wird als Wärme (quantitativ auch als Wärmemenge Q) bezeichnet. Der Wärmeübergang erfolgt immer von der höheren zur tieferen Temperatur, bis das System das thermodynamische Gleichgewicht erreicht hat.

Der Wärmetransport kann auf drei Arten erfolgen:

Wärmeleitung

Die Wärmeleitung, auch als Konduktion bezeichnet, ist die unmittelbare Übertragung von kinetischer Energie zwischen benachbarten Atomen oder Molekülen durch Materie und beim Kontakt von verschiedenen Stoffen. Mikroskopisch gesehen geben Atome oder Moleküle ihre Energie durch Stoss- oder Schwingungskopplung an die Nachbarn weiter, ohne dass dabei ein Materientransport stattfindet.

Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung ist die Übertragung von Wärme durch elektromagnetische Strahlung, meist infrarote Wellen. Bei der Wärmestrahlung gibt es nicht nur eine Wärmeübertragung von warm nach kalt, sondern auch von kalt nach warm. Der Wärmestrom von warm nach kalt ist immer grösser als umgekehrt, so dass die Resultierende von beiden Wärmeströmen immer von warm nach kalt zeigt. Wärmestrahlung ist die einzige Wärmeübertragungsart, die auch das Vakuum durchdringen kann.

Konvektion

Bei der Konvektion oder Wärmeströmung wird Wärme von einem strömenden Fluid als innere Energie oder Enthalpie mitgeführt. Es findet somit ein Materientransport statt.

Auf eine nähere Betrachtung der Wärmestrahlung und Konvektion wird nicht eingegangen, da diese beiden Arten des Wärmetransports vor allem in bewegten Flüssigkeiten und Gasen für den Wärmetransport verantwortlich sind. In Feststoffen, wie die Holzfaserdämmplatten, wird die Wärmebeinahe ausschliesslich über die Wärmeleitung transportiert.

2.3.1 BAUPHYSIKALISCHE KENNGRÖSSEN

Dämmstoff ist nicht gleich Dämmstoff. Doch damit die verschiedenen Dämmstoffe untereinander bezüglich der bauphysikalischen Eignung verglichen werden können, sind die Definitionen und Aussagen der baustoffabhängigen Kenngrössen zu kennen. Im Folgenden werden die wichtigsten bauphysikalischen Kenngrössen der Wärmeleitung kurz erläutert und die Grössenordnungen von verschieden Baustoffen gemäss Literatur angegeben. Auf bauphysikalische Kenngrössen, welche systemabhängig sind wird verzichtet, da im Rahmen der Arbeit nur baustoffabhängige Kenngrössen ermittelt werden.

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist ein baustoffspezifisches Mass für die Fähigkeit Wärme, unabhängig von der Dicke des Stoffs oder der Einbausituation, zu leiten. Die Wärmeleitfähigkeit λ gibt den Wärmestrom an, der bei einem Temperaturunterschied von 1 Kelvin (K) durch eine 1 m² grosse und 1 m dicke Schicht eines Stoffs geht. Je kleiner λ ist, um so besser ist das Dämmvermögen eines Baustoffes [6].

Kennzahl: Wärmeleitfähigkeit

Bezeichnung: λ (Lambda) Einheit: $[W/(m \cdot K)]$

Die Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffs wird im Wesentlichen von den folgenden Faktoren beeinflusst [6]:

- Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs
- Art, Größe und Anordnung der Poren oder Zellen
- Art und dem Druck der Gasfüllung in den Poren
- Struktur der festen Bestandteile
- Rohdichte
- Feuchtigkeitsgehalt
- Temperatur

Die Bemessungswerte gemäss DIN EN ISO 10456 für die Wärmeleitfähigkeit λ in [W/(m·K)] sind:

•	Bitumen	0,170
•	Beton ($\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$)	1,150
•	Luft	0,025
•	Natronglas	1,000
•	Wasser (10°C)	0,600
•	Eis (0°C)	2,200
•	Aluminiumlegierungen	160,000
•	Stahl	50,000
•	Polyvinylchlorid (PVC)	0,170
•	Holz ($\rho = 450 \text{ kg/m}^3$)	0,120
•	Holzfaserplatten ($\rho = 250 \text{ kg/m}^3$)	0,070

Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität c beschreibt das auf die Masse bezogene Wärmespeichervermögen von Baustoffen beschreibt.

Kennzahl: spezifische Wärmekapazität

Bezeichnung: c

Einheit: $[J/(kg \cdot K)] = [Ws/(kg \cdot K)]$

Gemäss Definition gibt die spezifische Wärmekapazität c an, wie gross die Wärmemenge Q ist, die 1 kg eines Stoffes aufnimmt oder abgibt, wenn dessen Temperatur um 1 K erhöht oder abgesenkt wird.

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \tag{2.1}$$

Dabei ist:

c spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]

Q Wärmemenge [J]

m Masse Wärmemenge [Kg]

 ΔT Temperaturdifferenz [K]

Die Bemessungswerte gemäss DIN EN ISO 10456 für die spezifische Wärmekapazität c in $[J/(kg\cdot K)]$ sind:

•	Bitumen	1000
•	Beton ($\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$)	1000
•	Luft	1008
•	Natronglas	750
•	Wasser (10°C)	4190
•	Eis (0°C)	2000
•	Aluminiumlegierungen	880
•	Stahl	450
•	Polyvinylchlorid (PVC)	900
•	Holz ($\rho = 450 \text{ kg/m}^3$)	1600
•	Holzfaserplatten ($\rho = 250 \text{ kg/m}^3$)	1700

Da die spezifische Wärmekapazität eine massenbezogene Kenngrösse ist, ist die Beurteilung der effektiven Wärmespeicherung nur bedingt aussagekräftig, da die stark unterschiedlichen Dichten nicht berücksichtigt werden.

Wärmespeicherzahl S

Die Wärmespeicherzahl eines Dämmstoffes ist ein guter Indikator für den sommerlichen Wärmeschutz, da es die gespeicherte Wärme in einem Dämmstoff charakterisiert, bevor die Wärme ins Hausinnere geleitet wird. Im Vergleich der verschiedenen Dämmstoffarten besitzen die Holzfaserdämmstoffe eine relativ hohe Wärmespeicherfähigkeit, während Mineral- und Polyesterfasern die geringsten Werte aufweisen.

Kennzahl: Wärmespeicherzahl

Bezeichnung: S

Einheit: $[J/(m^3 \cdot K)] = [Ws/(m^3 \cdot K)]$

Die Wärmespeicherzahl S, auch Wärmespeicherkoeffizient oder volumenbezogene Wärmekapazität genannt, gibt an, welche Wärmemenge in J von 1 m³ eines Stoffes bei einer Temperaturzunahme von 1 K aufgenommen bzw. bei einer Temperaturabnahme von 1 K abgegeben werden kann.

$$S = \rho \cdot c \tag{2.2}$$

Dabei ist:

S Wärmespeicherzahl $[J/(m^3 \cdot K)]$

 ρ Rohdichte [Kg/m³]

c spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]

Berechnete Kennwerte der Wärmespeicherzahl S in [J/(m³·K)] mit den Bemessungswerten aus der DIN EN ISO 10456 sind:

•	Bitumen	1050,00
•	Beton ($\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$)	2000,00
•	Luft	1,24
•	Natronglas	1875,00
•	Wasser (10°C)	4190,00
•	Eis (0°C)	1800,00
•	Aluminiumlegierungen	2464,00
•	Stahl	3510,00
•	Polyvinylchlorid (PVC)	1251,00
•	Holz (ρ = 450 kg/m ³)	720,00
•	Holzfaserplatten ($\rho = 250 \text{ kg/m}^3$)	425,00

Temperaturleitfähigkeit

Die Temperaturleitfähigkeit, auch Temperaturleitzahl oder Wärmediffusivität genannt, ist eine Materialeigenschaft, die zur Beschreibung der zeitlichen Veränderung der räumlichen Verteilung der Temperatur durch Wärmeleitung als Folge eines Temperaturgefälles dient [7].

Kennzahl: Temperaturleitfähigkeit

Bezeichnung: a Einheit: [m²/s]

Die Temperaturleitfähigkeit wird aus dem Quotienten der Wärmeleitfähigkeit λ und der Wärmespeicherzahl S berechnet. Sie beschreibt die Geschwindigkeit des thermischen Signals und ist eine temperaturabhängige Stoffeigenschaft, da insbesondere die Wärmeleitfähigkeit, jedoch auch die Dichte und die spezifische Wärme temperaturabhängig sind.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{\lambda}{S} \tag{2.3}$$

Dabei ist:

a Temperaturleitfähigkeit [m²/s]

 λ Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)

 ρ Rohdichte [Kg/m³]

c spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]

S Wärmespeicherzahl $[J/(m^3 \cdot K)]$

Berechnete Kennwerte der Temperaturleitzahl a in [m²/s] mit den Bemessungswerten aus der DIN EN ISO 10456 sind:

•	Bitumen	1,62·10 ⁻⁰⁷
•	Beton ($\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$)	5,75·10 ⁻⁰⁷
•	Luft	$2,02 \cdot 10^{-05}$
•	Natronglas	5,33·10 ⁻⁰⁷
•	Wasser (10°C)	$1,43 \cdot 10^{-07}$
•	Eis (0°C)	1,22·10 ⁻⁰⁶
•	Aluminiumlegierungen	6,49·10 ⁻⁰⁵
•	Stahl	1,42·10 ⁻⁰⁵
•	Polystyrol	1,17·10 ⁻⁰⁷
•	Polyvinylchlorid (PVC)	$1,36 \cdot 10^{-07}$
•	Holz ($\rho = 450 \text{ kg/m}^3$)	1,67·10 ⁻⁰⁷
•	Holzfaserplatten (ρ = 250 kg/m³)	$1,65 \cdot 10^{-07}$

2.3.2 Instationäre Wärmeleitung

Unter der instationären Wärmeleitung werden die zeitabhängigen Wärmeleitprozessen in Festkörpern verstanden. Sind die Wärmeleitprozesse zeitabhängig, so ist auch der Temperaturverlauf im Festkörper abhängig von der Zeit.

Der Wärmetransport infolge Wärmeleitung und der sich einstellenden Temperaturverteilung in einem Bauteil, kann durch lösen der Wärmeleitungsgleichung quantifiziert werden. Zur dessen Herleitung wird eine Wärmebilanz in einem Bauteil erstellt. Die Differenz der an der Stelle x einströmenden Wärmeenergie d^2Q_x und der an der Stelle x+dx abfliessenden Wärmeenergie d^2Q_{x+dx} , ist gleich der im Massenelement dm gespeicherten Energie. Durch die Teilung der Wärmeenergien durch die Zeit dt und die Bauteilfläche A folgt die Differenz der Wärmestromdichten q. Diese wird schliesslich auf die Breite dx des Massenelements bezogen [8]. In Abbildung 2.7 ist die Wärmeleitung und die Wärmespeicherung im Bauteil schematisch dargestellt.

$$\frac{d^{2}Q_{x}}{dt \cdot A} - \frac{d^{2}Q_{x+dt}}{dt \cdot A} = \frac{c \cdot dm}{A} \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{c \cdot \rho \cdot dV}{A} \cdot \frac{dT}{dt} = \rho \cdot c \cdot dx \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$q(x) - q(x + dx) = \rho \cdot c \cdot dx \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$\frac{q(x) - q(x + dx)}{dx} = \rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$\frac{dq}{dx} = \rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$$
(2.4)

Dabei ist:

Q Wärmenergie [Ws = J]

q Wärmestromdichte [W/m²]

dt Zeit [s]

A Bauteilfläche [m²]

dm Massenelemt

dT Temperatur [°C]

 ρ Rohdichte [kg/m³]

c spezifische Wärmekapazität [Ws/kg·K]

dx Position [m]

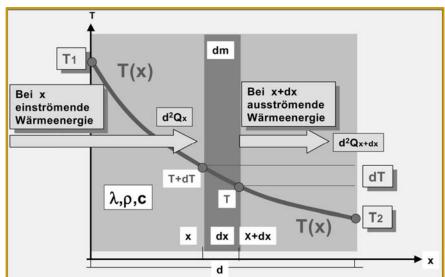


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Wärmeleitung und Speicherung in einer Wand [8]

Durch Einsetzen des Fick'schen Gesetz,

$$q = -\lambda \cdot \frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dx}} \tag{2.5}$$

dass die Wärmestromdichte q proportional dem Temperaturgradienten dT/dx ist, in die Wärmebilanzgleichung (2.4), kann die allgemeine instationäre Wärmeleitungsgleichung für die eindimensionale Darstellung hergeleitet werden.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial}{\partial x} T \right) = \rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$\lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$$

$$a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{dT}{dt} \quad \text{mit } a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$
(2.6)

Dabei ist:

 λ Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]

 ρ Dichte [kg/m³]

 $\frac{\partial^2 T}{(\partial x)^2}$ Krümmung des Temperaturverlaufes am Ort x in der Platte zum Zeitpunkt t

 $\frac{\partial T}{\partial t}$ — Steigung des zeitlichen Temperaturverlaufes am Ort x zum Zeitpunkt t

a Temperaturleitfähigkeit [m/s²]

2.3.3 STATIONÄRE, EINDIMENSIONALE WÄRMELEITUNG

Für den stationären Fall wird angenommen, dass die Temperaturen in Bauteil und an dessen Rändern konstant bleiben. Somit gilt:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \tag{2.7}$$

Wird die Gleichung (2.7) in die Gleichung (2.4) eingesetzt so reduziert sich diese auf:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \tag{2.8}$$

Durch die zweifache Integration und einsetzen der Randbedingungen, dass sich an x = 0 die höhere Temperatur T_0 und an Stelle x = d die tiefere Temperatur T_1 befindet, folgt der lineare Temperaturverlauf im Bauteil:

$$T(x) = T_0 - \left(\frac{T_0 - T_1}{d}\right) * x$$
 (2.9)

Aus Gleichung (2.9) wird ersichtlich, dass sich im Bauteil geradliniges Temperaturfeld einstellt. Durch Integration der Gleichung (2.9) und einsetzen der obengenannten Randbedingungen folgt:

$$Td = T0 - \left(\frac{q}{\lambda}\right) * d \tag{2.10}$$

Durch Auflösen nach q folgt:

$$q = \frac{T_0 - T_1}{d/\lambda} = \frac{T_0 - T_1}{R} \tag{2.11}$$

Dabei ist:

dT Temperatur [°C]

dt Zeit [s]

q Wärmestromdichte [W/m²]

A Bauteilfläche [m²]

dm Massenelemt

 ρ Rohdichte [kg/m³]

c spezifische Wärmekapazität [Ws/kg·K]

dx Position [m]

Es kann gezeigt werden, dass im Falle einer stationären Wärmleitung, keine Wärme im Bauteil gespeichert wird (2.8) und die Wärmestromdichte q konstant bleibt (2.11). Es stellt sich ein linearer Temperaturverlauf im Bauteil ein (2.9), der sich zeitlich nicht ändert.

2.4 WÄRMELEITUNG IN HOLZFASERDÄMMPLATTEN

Die Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität sind baustoffspezifische Grössen, mit welchen die Wärmeleitung im Baustoff beschrieben werden kann. Da jedoch die bauspezifischen Grössen von Holz und Holzwerkstoffen wesentlich vom strukturellen Aufbau beeinflusst werden, sind die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität keine konstanten Grössen. Wichtige Einflussfaktoren sind:

- die Holzart und dessen Porenstruktur
- die Rohdichte (nur Wärmeleitfähigkeit)
- die Faserorientierung (nur Wärmeleitfähigkeit)
- der Feuchtegehalt
- die Temperatur

Die Rohdichte hat auf die spezifische Wärmekapazität keinen Einfluss, da die spezifische Wärmekapazität eine massenbezogene Grösse ist. Die Rohdichte hat hingegen einen grossen Einfluss auf die Wärmespeicherzahl S, der volumenbezogenen Wärmekapazität.

2.4.1 WÄRMELEITFÄHIGKEIT

Rohdichte und Faserrichtung

Wie in der Abbildung 2.8 ersichtlich, steigt mit zunemender Rohdichte die Wärmeleitfähigkeit. Gemäss Kollmann [9] in [10] ergibt sich bei einem Feuchtegehalt von 12% für die Wärmeleitfähigkeit in Fasererrichtung folgende Gleichung:

$$\lambda_{\parallel} = 0.026 + 0.195 \cdot \rho * 10^{-3} \tag{2.12}$$

Dabei ist

 λ_{\parallel} Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung [W/(m·K)]

 ρ Rohdichte [kg/m3]

Parallel zur Faserrichtung wurde folgende Beziehung für die Wärmeleifähigkeit des Holzes ermittelt:

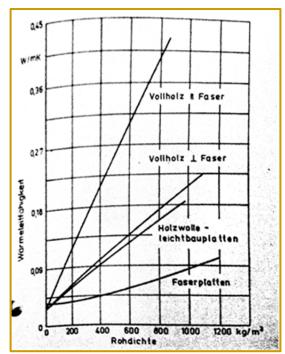
$$\lambda_{\perp} = 0.026 + 0.46 \cdot \rho * 10^{-3} \tag{2.13}$$

Dabei ist

 λ_{\perp} Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung [W/(m·K)]

ρ Rohdichte [kg/m3]

Parallel zur Faserrichtung des Holzes ist die Wärmeleifähigkeit 1,5 bis 2,8 mal grösser als senkrecht zur Faserrichtung bzw. in tangentialer Richtung (vgl. [11]). Die Wärmeleitfähigkeit in radialer Richtung ist gemäss [10] in einem Grössenbereich von rund 10% höher als in tangentialer Richtung, was auf die erleichterte Wärmeleitung in radialer Richtung durch die Holzstrahlen zurückzuführen ist. In einigen Holzarten wurden jedoch gemäss [11] auch grössere Unterschiede radial/tangential von 30% bzw. eine Verringerung von -10% gemessen. Im Allgemeinen können die Differenzen zwischen radialer und tagentialer Richtung vernachlässigt werden. In Abbildung 2.8 links ist die Abhängigkeit der Wärmeleitung von der Rohdichte der Holz und Holzwerkstoffe dargestellt.



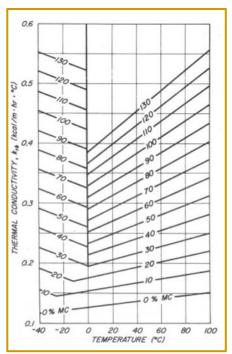


Abbildung 2.8: Darstellung der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Rohdichte [10] (links) und der Abhängigkeit von der Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt [12] (rechts)

Feuchtigkeit

Bedingt durch die ca. 20-fach höhere Wärmeleitfähigkeit von Wasser als Luft und der leicht erhöhten Wärmeleitfähigkeit in Bezug auf die Zellwandsubstanz, steigt die Wärmeleitfähigkeit mit dem Feuchtigkeitsgehalt. Die Beziehung Feuchtigkeit und Wärmeleitfähigkeit ist linear und kann mit der folgenden Gleichung (vgl. [10]) beschrieben werden:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot [1 - 0.0125(u_1 - u_2)] \tag{2.14}$$

Dabei ist

 λ_1, λ_2 Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung bei den Holzfeuchten u_1, u_2 [W/(m·K)]

 u_1, u_2 Holzfeuchte bei den Klimabedingungen 1 und 2 [%]

Temperatur

Wie in den meisten Dämmstoffen steigt die Wärmeleitfähigkeit bei Erhöhung der Temperatur (siehe Abbildung 2.8 rechts). Je grösser der Porenanteil des Dämmstoffs ist, desto grösser ist dieser Effekt.

2.4.2 SPEZIFISCHE WÄRMEKAPAZITÄT

Holzart

Gemäss [10] hat die Holzart nur einen marginalen Einfluss auf die spezifische Wärmekapazität. Die Messwerte von Kollmann [9] in [10] zeigen, dass im darrtrockenen Zustand verschiedener Hölzer Unterschiede von bis zu 100 J/(kg·K) aufweisen. Da die spezifische Wärmekapazität eine massenbezogene Kenngrösse ist, hat die Rohdichte keinen Einfluss. Die Unterschiede der Holzarten sind möglicherweise auf die unterschiedlichen Zusammensetzungen der Zellwände zurückzuführen.

Temperatur

Die spezifische Wärmekapazität von Holz erhöht sich mit steigender Temperatur. Für Holz im darrtrockenen Zustand und einem Temperaturbereich von 200 bis 400 K gilt nach [11]:

$$c_o = 4,86 \cdot [T - 44] \tag{2.15}$$

Dabei ist

 c_o spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]

Temperatur [K]

In [13] ist eine ähnliche Gleichung für den Temperaturbereich von 280 bis 420 K angegeben, die den Zusammenhang der Temperatur und der spezifischen Wärmekapazität von darrtrockenem Holz folgendermassen beschreibt:

$$c_o = 1000 \cdot (0.1031 + 0.003867 \cdot T) \tag{2.16}$$

Dabei ist

 c_o spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]

T Temperatur [K]

In Tabelle 2.1 sind für diverse Temperaturen die spezifischen Wärmekapazitäten, gemäss den Gleichungen (2.15) und (2.16) angegeben. Es ist zu erkennen, dass bei Temperaturen unterhalb von 50°C die Gleichung (2.15) tiefere Werte für die spezifische Wärmekapazität als Gleichung (2.16) aufweist. Bei Temperaturen oberhalb von 50°C verhält es sich umgekehrt. Die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant unterschiedlich.

Tabelle 2.1: Vergleich der Temperaturabhängigkeit der spez. Wärmekapazität gemäss Gleichung (2.15) und Gleichung (2.16)

Temperatur [°C]	Temperatur [K]	Spez. Wärmekapazität gemäss Gleichung (2.15) [J/kg·K]	Spez. Wärmekapazität gemäss Gleichung (2.16) [J/kg·K]
0	273	1113	
10	283	1162	1197
20	293	1210	1236
30	303	1259	1275
40	313	1307	1313
50	323	1356	1352
100	373	1599	1545

Feuchtegehalt

Da die spezifische Wärmekapazität von Wasser mit 4187 J/(kg·K) deutlich höher ist als jene des Holzes bzw. Holzwerkstoffes, so erhöht sich die spezifische Wärmekapazität mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt. Die Gleichungen (2.15) und (2.16) können mit dem Einfluss der Feuchtigkeit modifiziert werden.

Gemäss [11] gilt für den Temperaturbereich von 273 K und 360 K und einem Feuchtigkeitsgehalt bis zu 30% die folgende Beziehung:

$$c_o = \frac{4,86 \cdot [T - 44] + 4187 \cdot u}{1 + u} + (T - 273)^{1,7}$$
(2.17)

Dabei ist

 c_o spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]

T Temperatur [K]

u Feuchtigkeitsgehalt [%]

In [13] ist für den Einfluss der Feuchtigkeit, kombiniert mit dem Einfluss der Temperatur für den Temperaturbereich von 280 K und 420 K, die folgende Gleichung (2.16) geben:

$$c_o = 1000 \cdot \left[\frac{0.1031 + 0.003867 \cdot T + 0.01 \cdot u \cdot 4.19}{1 + 0.01 \cdot u} + u \cdot (-4.23 \cdot 10^{-4} + 3.12 \cdot 10^{-5} - 3.17 \cdot 10^{-5}) \right]$$
 (2.18)

Dabei ist

 c_o spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]

T Temperatur [K]

u Feuchtigkeitsgehalt [%]

Auch Kollmann hat in [9] aus [10] den Einfluss des Feuchtegehalts auf die spezifische Wärmekapazität bei konstanter Temperatur untersucht. Bei welcher Temperatur die Messungen durchgeführt wurden ist nicht ersichtlich. In Tabelle 2.2 sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 2.2: Einfluss des Feuchtegehalts und Holzart auf die spezifische Wärmekapazität [J/kg·K]

Holzart		Feuchtigkeitsgehalt in %							
HUIZAIT	0	5	10	20	30	100			
Fichte	1350	1510	1630	1800	2180	2800			
Kiefer	1410	1540	1660	1870	2330	2800			
Eiche	1450	1590	1670	1910	2370	2790			
Buche	1460	1600	1710	1920	2310	2830			

2.5 BESTIMMUNG DER SPEZIFISCHEN WÄRMEKAPAZITÄT

Die spezifische Wärmekapazität kann durch auflösen der instationären Wärmeleitungsgleichung (2.5) nach der spezifischen Wärmekapazität c berechnet werden.

$$c = \frac{\lambda}{\rho} \cdot \frac{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}}{\frac{\partial T}{\partial t}}$$
 (2.19)

Dabei ist:

c spezifischen Wärmekapazität c [J/(kg·K)]

 λ Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]

 ρ Dichte [kg/m³]

 $\frac{\partial^2 T}{(\partial x)^2}$ Krümmung des Temperaturverlaufes am Ort x in der Platte zum Zeitpunkt t

 $rac{\partial T}{\partial t}$ Steigung des zeitlichen Temperaturverlaufes am Ort x zum Zeitpunkt t

Die benötigten Grössen, die bekannt sein müssen, sind:

- die Rohdichte
- die Wärmeleitfähigkeit
- der Temperaturverlauf in der Platte
- der zeitliche Temperaturverlauf an einem oder mehreren Positionen in der Platte

Die Rohdichte kann durch messen der Masse und des Volumens des Bauteils einfach berechnet werden. Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte mit einem Einplatten-Wärmeleifähigkeitsmessgerät wie dem λ -Meter EP500 (vgl. Kapitel 3.1). Die Schwierigkeit in der Berechnung der spezifischen Wärmekapazität besteht in der Bestimmung des Temperaturverlaufs im Plattenquerschnitt.

Können auf den Oberflächen und im Bauteil Temperaturmessfühler eingebracht werden, so kann der Temperaturverlauf in der Platte durch Kurveneinpassung (Fitting) ermittelt werden. Wird die Temperatur in der Platte über einen gewisse Zeitdauer gemessen, so kann auf den zeitlichen Temperaturverlauf an den verschiedenen Orten rückgeschlossen werden.

Ist der Zugang ins Innere des Bauteils nur beschränkt oder nicht möglich, so kann der Temperaturverlauf in der Holzfaserdämmplatte sehr aufwendig analytisch berechnet oder mit Näherungsverfahren angenähert werden. Für die analytische Berechnung oder die nummerische Näherung müssen mehrere Anfangs- und Randbedingungen bekannt sein. Mögliche nummerische Verfahren und deren Umsetzung sind ausführlich in [14] beschrieben.

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 WÄRMELEITFÄHIGKEITSMESSUNG

Die Wärmeleitfähigkeitsmessungen wurden mit dem Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ -Meter EP500 der Lambda-Messtechnik GmbH Dresden durchgeführt. Er eignet sich zur Durchführung von Absolutwertmessungen nach dem Einplattenverfahren gemäss folgenden Normen:

- ISO 8302
- EN 1946-2
- EN 12664
- EN 12667
- EN 12939
- ASTM C177
- DIN 52612 (zurückgezogen, ersetzt durch EN 12667)

Vor der Wärmeleitfähigkeitsmessung muss der Anpressdruck, die Mitteltemperatur, die Temperaturdifferenz sowie ein Abbruchkriterium der Messung definiert werden. Die Variationsmöglichkeit der genannten Einstellungsparametern des " λ -Meter EP500" sind produktespezifisch folgendermassen beschränkt:

- Pressdruck eistellbar zwischen 50 N/m² und 2500 N/m²
- Mittlere Messtemperatur einstellbar zwischen 10°C und 40°C
- Temperaturdifferenz einstellbar zwischen 5°C und 15°C

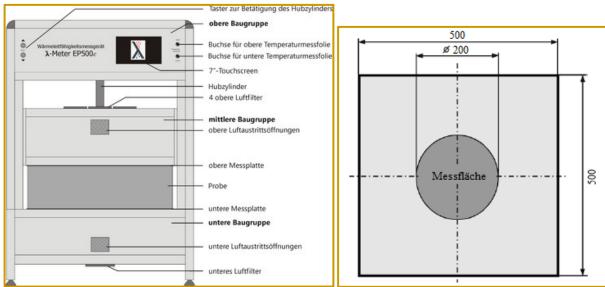


Abbildung 3.1: Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ-Meter EP500 (links) und Messfläche (rechts) [15]

Das Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät misst vor dem Start der Messung automatisch die Probendicke d der eingelegten Platte gemäss der DIN 18164 bzw. DIN 18165, welche eine bestimmte flächenhafte Beanspruchung der Probe für die Messung der Probendicke vorschreibt. Die Probekörper sollen idealerweise ein Format von 500x500 mm² aufweisen. Die eigentliche Messzone hingegen, eine Kreisfläche mit 200 mm Durchmesser, liegt in der Mitte der Probe und bestimmt das Mindestmass der Probengrösse.

Das Material ausserhalb der Messfläche geht nicht ins Messergebnis ein. Im Aussenbereich der Probe werden mit Schutzheizungen und Kühlringen optimale thermische Bedingungen geschaffen, damit sich im Messbereich ein exakt eindimensionales, stationäres Temperaturfeld einstellen kann. Eine thermostationierte Messkammer, wie an der ETH Zürich vorhanden, ist somit nicht notwendig.

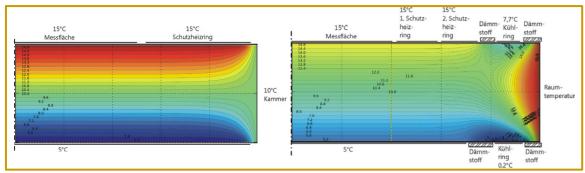


Abbildung 3.2: Temperaturfeld in Messplatte [15]

Die Wärmeleitfähigkeit der Probe kann mittels der dem Wärmestrom äquivalenter elektrische Leistung der Messheizung P

$$P = U \cdot I \tag{3.1}$$

und

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot \Delta T} = \frac{U \cdot I \cdot d}{A \cdot \Delta T} \tag{3.2}$$

gemäss der EN 12667 Abs. 8.2.2 ermittelt werden. Ändert sich die äquivalenter elektrische Leistung der Messheizung nicht mehr, das heisst sie ist konstant, so wurde ein stationärer Zustand im Probekörper erreicht.

3.1.1 EINFLUSS DES ANPRESSDRUCK

Der Einfluss des Anpressdrucks wurde an zwei verschiedenen Holzfaserdämmplattentypen mit 60 mm Plattendicke untersucht. Die beiden Holzfaserdämmplattentypen sind:

ISOROOF-NATUR-KN von Pavatex: - Nassverfahren

- Schichtenverklebt (3 x 20 mm)

- Rohdichte ρ = 240 Kg/m³

- Wärmeleitfähigkeit λ_D = 0,047 W/(m·K)

holzFlex® protect von Homatherm: - Trockenverfahren

- 60 mm

- Rohdichte ρ = 55 Kg/m³

- Wärmeleitfähigkeit λ_D = 0,038 W/(m·K)

Je Variante wurden jeweils 3 Proben auf eine Plattengrösse von 500 x 500 mm² mit einer Formatkreissäge zugeschnitten und vor der Prüfung im Klimaraum mit einem Normalklima von 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit bis zum Ausgleichszustand gelagert.

Für die Messung des Einflusses bezüglich des Anpressdrucks wurde die volle Variationsmöglichkeit der Presskraft des Lambda-Meters ausgenutzt. Auf den drei Anpressdruckstufen 50 N/m², 1225 N/m² und 2500 N/m² wurde jeweils die Wärmeleitfähigkeit jeder Messplatte abwechselnd gemessen. Die übrigen Einstellungsparametern wurden für alle Messungen konstant gehalten bei:

- Mitteltemperatur = 20°C
- ΔT = 10°C
- Messabbruch bei Wärmeleitfähigkeits-Messwertänderung < 1% in 60 min

Durch das ständige Auswechseln der Holzfaserdämmplatte und der zwischenzeitlichen Lagerung der Platte im Normalklima konnte der Messeinfluss der ändernden Feuchtigkeit innerhalb der Platte minimiert bzw. ausgeschlossen werden.

3.1.2 EINFLUSS DER MESSMETHODE

Der Einfluss der Messmethode auf die Wärmeleitfähigkeit wurde ausschliesslich am Holzfaserdämmplattentyp ISOROOF-NATUR-KN von Pavatex (vgl. oben) durchgeführt. Die Messung, eine Dreifachmessung bei unterschiedlichen mittleren Temperaturen, erfolgte jeweils an drei unterschiedlichen Proben. Folgende Temperaturfolgen der Dreifachmessungen wurden gemessen:

- 10°C / 20°C / 30°C
- 20°C / 30°C / 10°C
- 30°C / 10°C / 20°C
- 30°C / 10°C / 20°C

Die übrigen Einstellungsparametern wurden für alle Messungen konstant gehalten bei:

- Pressdruck 2500 N/m²
- ΔT = 10°C
- Messabbruch bei Wärmeleitfähigkeits-Messwertänderung < 1% in 60 min

^{*} Falls nicht anders vermerkt, wurden die Kennwerte aus den jeweiligen Produktdatenblättern entnommen.

3.2 WÄRMEKAPAZITÄTSMESSUNG

Wie im Kapitel 2.5 erläutert, erfolgt die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität durch auflösen der instationären Wärmeleitungsgleichung (2.10). Grundbedingung zur Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität ist somit, dass durch den Querschnitt der Platte überhaupt eine instationäre Wärmeleitung stattfindet. Befindet sich die Holzfaserdämmplatte nach der Lagerung im Klimaraum in einem Ausgleichszustand, so kommt es zu keiner Wärmeleitung, da in der Platte keine Temperaturgradienten vorhanden sind. Damit eine spezifische Wärmekapazität bestimmt werden kann, muss ein Temperaturgradient zwischen dem Innern und der Oberfläche bzw. zwischen den beiden Oberflächen der Platten herbeigeführt werden. Dieser Temperaturgradient kann entweder durch das Erhitzen bzw. Abkühlen der Oberflächen aufgebracht werden. Als Methode zum Herbeiführen des Temperaturgradienten wurde zum einen das Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ-Meter EP500 und zum anderen einen Halogenstrahler mit einer Leistung von 150 Watt eingesetzt.





Abbildung 3.3: Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ -Meter EP500 (links) und Halogenstrahler (rechts) im Einsatz als Wärmequelle.

Ein wichtiger Parameter, der zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität benötigt wird, ist der Temperaturverlauf im Plattenquerschnitt an verschiedenen Zeitpunkten. Durch Einbringen von Temperaturmessfühlern in unterschiedlichen Tiefen der Platte kann der Temperaturverlauf in der Platte über die Zeit gemessen bzw. ermittelt werden. Je nach Holzfaserdämmplatte gestaltet sich das Einbringen der Messfühler einfacher oder schwieriger. In dichten Holzfaserdämmplatten ist es nicht gelungen, die Messfühler ohne grössere strukturelle Zerstörung der Platte im Platteninneren zu positionieren. Grössere strukturelle Zerstörungen der Platte, vor allem jene die bis an die Aussenseite gelangen, sollen so gut wie möglich vermieden werden, damit keine Wärmeverluste durch die Defekte erfolgen können.

In Holzfaserdämmplatten mit geringer Rohdichte konnten die Messfühler mit Hilfe eines Messingröhrchens ins Platteninnere eingeführt werden. Dazu wurde das Messingröhrchen durch die Holzfaserdämmplatte gestossen und die Messfühler durchgezogen werden. Durch herausziehen des Messingröhrchens auf der anderen Seite kann der Messfühler durch zurückziehen in der Plattenmitte plaziert werden. Eine geringe Zerstörung des Gefüges im Innern der Holzfaserdämmplatte kann durch das Einführen des Messingröhrchens nicht ganz verhindert werden, jedoch waren von aussen keine wesentlichen Defekte ersichtlich.

Am einfachsten gestaltet sich der Einbringvorgang der Messfühler, wenn mehrere dünne Platten zu einer dickeren Platte geschichtet werden. Aus diesem Grund wurden die Messungen hauptsächlich an geschichteten Proben durchgeführt. Durch das Zusammenpressen der geschichteten Holzfaser-

dämmplatten im Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät λ-Meter EP500 durch den Anpressdruck bzw. im Versuchsaufbau mit dem Halogenstrahler durch Schraubzwingen, kann ein genügender Kontakt zwischen den Platten für die Wärmeleitung garantiert werden. Während den Messungen wurde mittels Thermographie untersucht, ob in den Zwischenschichten Wärmeströmungen in den Aussenraum stattfinden. Mit den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass in den Zwischenschichten keine erkennbaren Wärmeströmungen und somit Wärmeverluste aufgetreten sind.

Die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität wurde an den folgenden Materialien erprobt:

PAVABOARD von Pavatex: - Nassverfahren

- 3 Platten à 500 x 500 x 20 mm³ nicht Schichtenverklebt

- Rohdichte ≈ 210 Kg/m³

- Wärmeleitfähigkeit λ_D = 0,046 W/(m·K) - Spezifische Wärmekapazität c = 2100 J/(kg·K)

holzFlex® protect von Homatherm: - Trockenverfahren

- 1 Platte à 500 x 500 x 60 mm³ - Rohdichte ρ = 55 Kg/m³

- Wärmeleitfähigkeit λ_D = 0,038 W/(m·K) - Spezifische Wärmekapazität c = 2100 J/(kg·K)

Polystyrolplatten: - 6 Platten à 500 x 500 x10 mm³

- Spezifische Wärmekapazität c ≈ 1200 J/(kg·K) bei 0°C [16]

Während dem Erhitzen bzw. Abkühlen der Holzfaserdämmplatten wurden in regelmässigen Intervallen die Temperaturverläufe im Plattenquerschnitt mit dem Messgerät Alemo 2590-4S der Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH gemessen. Mit den vorhandenen Messfühlern konnten die Temperaturen in den Proben mit einer 1/10-Genauigkeit gemessen und für die Weiterverwendung mit einer Auswertungssoftware gespeichert werden.

Die Auswertung der Messwerte erfolgte in Tabellenkalkulationsprogramm Excel von Microsoft. Der Temperaturverlauf in der Platte wurde dazu in jedem Zeitschritt mit einer Polynom-Regression der Temperaturmesswerte berechnet. Je nach Anzahl Messpunkte wurde die Polynom-Regression unterschiedlichen Grades durchgeführt. Das gleiche Verfahren wurde für die Ermittlung des zeitlichen Temperaturverlaufes an den verschieden Orten verwendet. Mit dem Bekanntsein der gefitteten Funktionsverläufen, konnten die beiden benötigen Grössen, die Krümmung des Temperaturverlaufes im Plattenquerschnitt und die Steigung des zeitlichen Temperaturverlaufes an einem Ort, mathematisch durch die zweifache bzw. einfach Ableitung der Funktionen berechnet werden.

^{*} Falls nicht anders vermerkt, wurden die Kennwerte aus den jeweiligen Produktdatenblättern entnommen.

4 ERGEBNISSE UND DISSKUSION

4.1 WÄRMELEITFÄHIGKEITSMESSUNG

4.1.1 EINFLUSS DES ANPRESSDRUCK

In der Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 sind die Einzelwerte bzw. die Mittelwerte der Messergebnisse der geprüften Holzfaserdämmplatter bezüglich des Anpressdrucks ersichtlich. Es kann gezeigt werden, dass die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Anpressdruck bei beiden Holzfaserdämmplatten-Typen abnimmt. Zudem ist zu erkennen, dass für die Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit bei den verschiedenen Anpressdrücken ein stark linearer Zusammenhang zwischen dem Pressdruck und der Wärmeleitfähigkeit besteht. Wie in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 jeweils links dargestellt, kann für die lineare Regression der Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit abhängig vom Anpressdruck ein Bestimmtheitsmass von 89% für die dichten Holzfaserdämmplatten bzw. 99% für die flexiblen Holzfaserplatten mit geringer Dichte berechnet werden.

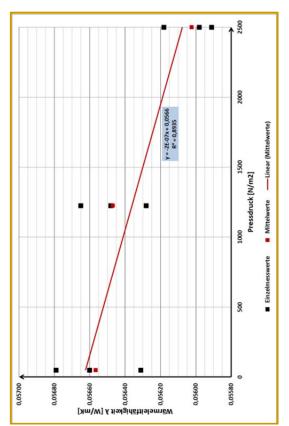
Bei den flexiblen Holzfaserdämmplatten kommt es durch den Anpressdruck zu einer mittleren Verdichtung von 17.23% gegenüber der Dichte bei 50 N/m². Bei den Dichten Holzfaserdämmplatten ist die Verdichtung mit 2,28% deutlich geringer. Wird die Veränderung der Dichte der Holzfaserdämmplatte mit der Veränderung der Wärmeleitfähigkeit infolge des Anpressdruckes verglichen, so kann erstaunlicherweise festgestellt werden, dass die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Dichte abnimmt. Wie in Kapitel 2.4 gezeigt, nimmt allgemein bekannt die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Dichte zu.

Tabelle 4.1: Einzelmesswerte der Messergebnisse zum Einfluss des Anpressdruckes auf die Wärmeleitfähigkeit

Material	Nr.	Anpressdruck	Dicke	Masse	Δ Masse	Rohdichte	λ	R
		[N/m²]	[mm]	[g]	[%]	[kg/m³]	[W/(m·K)]	[m²K/·W]
	1		59,6	3706,0	0,04%	248,72	0,05591	1,07
	2	2500	59,4	3682,6	0,00%	247,99	0,05618	1,06
	3		59,2	3663,2	0,10%	247,51	0,05598	1,06
ISOROOF-	1		60,5	3715,2	0,09%	245,63	0,05648	1,07
NATURE-KN	2	1225	60,3	3691,2	0,05%	244,86	0,05628	1,07
NATURE-KIV	3		60,2	3662,6	0,04%	243,36	0,05665	1,06
	1		60,7	3711,5	0,09%	244,58	0,05660	1,07
	2	50	60,8	3688,2	0,05%	242,64	0,05631	1,08
	3		60,9	3659,5	0,10%	240,36	0,05679	1,07
	1		53,4	881,7	0,21%	66,05	0,03921	1,36
	2	2500	51,1	883,4	0,63%	69,15	0,03891	1,31
	3		52,4	870,8	0,06%	66,47	0,03923	1,34
h - I - E I ®	1		53,3	882,1	0,05%	66,20	0,03921	1,36
holzFlex®	2	1225	55,8	881,7	0,67%	63,20	0,03969	1,41
protect	3		55,1	870,0	0,80%	63,16	0,04013	1,37
	1	•	59,0	881,4	0,08%	59,76	0,04020	1,47
	2	50	62,8	882,0	0,11%	56,18	0,04030	1,56
	3		62,1	870,50	0,18%	56,07	0,04023	1,54

Tabelle 4.2: Mittelwerte der Messergebnisse zum Einfluss des Anpressdruckes auf die Wärmeleitfähigkeit

Material	Anpressdruck [N/m²]	Mittelwert Dichte [kg/m³]	Mittelwert von λ [W/(m·K)]	Standardabweichung von λ [W/(m·K)]
ISOROOF- NATURE-KN	2500	248,07	0,05602	0,000114
	1225	244,62	0,05647	0,000151
	50	242,53	0,05657	0,000197
holzFlex® protect	2500	67,22	0,03912	0,000146
	1225	64,19	0,03968	0,000376
	50	57,34	0,04024	0,000042



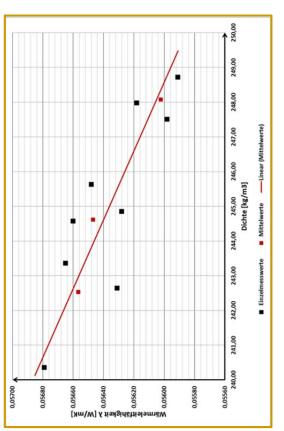
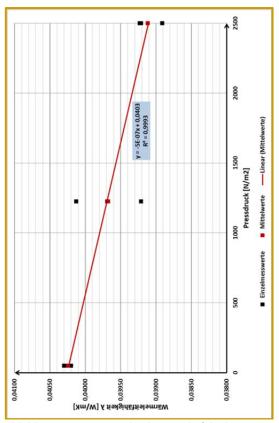


Abbildung 4.1: Anpressdruck-Wärmleifähigkeits-Diagramm (links) und Rohdicht-Wärmleifähigkeits-Diagramm (rechts) der Holzfaserdämmplatte "ISOROOF-NATURE-KN"



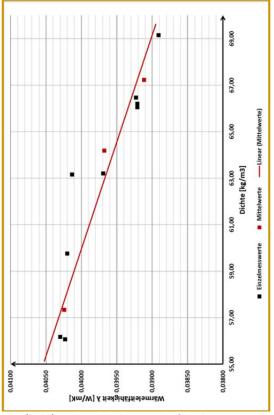


Abbildung 4.2: Anpressdruck-Wärmleifähigkeits-Diagramm (links) und Rohdicht-Wärmleifähigkeits-Diagramm (rechts) der Holzfaserdämmplatte "holzFlex® protect "

Eine mögliche Ursache für das aussergewöhnliche Ergebnis, dass bei den durchgeführten Messungen die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Rohdichte sinkt, ist, dass durch den geringeren Anpressdruck Wärmeverluste im Übergang der Messplatten des Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgeräts es und der Holzfaserdämmplatten auftreten. Die Wärmeverluste können durch die geringere Verdichtung der Oberfläche entstehen, da die Hohlräume zwischen der Holzfaserdämmplatte und der Messplatte weniger geschlossen werden, als bei höherem Anpressdruck. In diesen Hohlräumen kann es während der Messung zu Wärmeströmungen mit dem Aussenraum kommen, was die Messwerte verfälscht. Die Schutzheizung, in Abbildung 3.2 dargestellt, welche Wärmeströmungen mit dem Aussenraum verhindern sollte, kann durch den mangelnden Druck auf die Oberfläche der Holzfaserdämmplatte möglicherweise nicht die gewohnte Schutzfunktion wahrnehmen.

Obwohl die Messresultate nicht abschliessend begründet werden können, kann die Aussage getroffen werden, dass bei zukünftigen Wärmeleitfähigkeitsmessungen immer mit dem maximal erlaubten Anpressdruck durchgeführt werden können.

4.1.2 EINFLUSS DER MESSMETHODE

In der Tabelle 4.3 sind die Mittelwerte der Wärmeleitfähigkeit der verschieden Dreifachmessungen mit dem Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät aufgeführt. Die Messwerte zeigen eine deutliche Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmplatten. Je tiefer die Mitteltemperatur, desto kleiner wurde die Wärmeleitfähigkeit gemessen.

Die Messgenauigkeit des Wärmeleitfähigkeitsmessgeräts λ-Meter EP 500 kann anhand der Standardabweichung der Wärmeleitfähigkeits-Messung ausgedrückt werden. Die Standardabweichungen der drei Messungen pro Messfolge sind mit 0,00005 bis 0,00031 W/(m·K) sehr gering. Dies entspricht einer Abweichung vom Mittelwert von 0,10 bis 0,52%.

Tabelle 4.3: Mittelwerte der Messergebnisse zum E	Einfluss der Messmethode
---	--------------------------

Messfolge [°C]	Temp. [°C]	Rohdichte ρ	λ-Mittelwert [W/(m·K)]	λ-Standardab. [W/(m·K)]	Regression λ10-Mittelwert [W/(m·K)]]	Differenz Regression + Messung [W/(m·K)]
	10	248,70	0,04967	0,00018	0,04961	0,00006
10 / 20 /30	20	248,70	0,05354	0,00017		
	30	248,70	0,05777	0,00020		
	20	248,23	0,05626	0,00015		
20/30/10	30	248,23	0,05769	0,00010		
	10	248,23	0,04729	0,00019	0,05106	0,03767
	30	249,50	0,05821	0,00031		
30/20/10	20	249,50	0,05079	0,00019		
	10	249,50	0,04719	0,00021	0,04719	0,00000
	30	248,60	0,05754	0,00008		
30/10/20	10	248,60	0,04725	0,00005	0,04724	0,00000
	20	248,60	0,05024	0,00005		

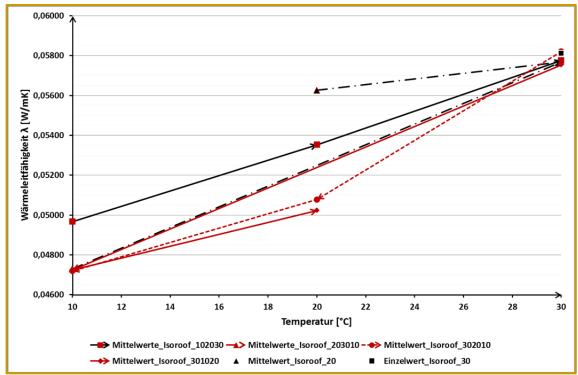


Abbildung 4.3: Temperatur-Wärmleitfähigkeits-Diagramm der Holzfaserdämmplatte "ISOROOF-NATURE-KN"

In der Abbildung 4.3 sind die Messergebnisse aus Tabelle 4.3 grafisch dargestellt. Auffallend ist, dass

- die gemessenen Wärmeleitfähigkeitswerte bei 30°C beinahe unabhängig von der Messmethode sind.
- die gemessenen Wärmeleitfähigkeitswerte der Startmessung der Dreifach-Messung immer höher sind, als jene die die einen Temperaturpfad hinter sich haben.
- die gemessenen Wärmeleitfähigkeitswerte bei 10°C, die eine Vormessung haben, keine markanten Unterschiede aufweisen.
- die zusätzlich ermittelten Wärmeleitfähigkeitswerte von Einfachmessungen bei 20°C bzw. 30°C sich nicht von den Startmessungen der entsprechenden Messfolge unterscheiden.
- die Steigung der Messung von 10°C auf 20°C der Messfolgen 10°C /20°C /30°C und 30°C /10°C /20°C beinahe gleich sind.
- die gemessenen Wärmeleitfähigkeitswerte bei 20°C am stärksten von der Messfolge abhängig sind.
- die Messfolge 10°C /20°C /30°C ein stark linearer Zusammenhang aufweist. Die lineare Regression weist ein Bestimmtheitsmass von 99.93% auf.

Das gezeigte Verhalten der Holzfaserdämmplatte bei Dreifachmessungen bzw. bei Temperaturänderung ist möglicherweise auf Verschiebungen von Feuchtigkeit innerhalb der Holzfaserdämmplatte zurückzuführen. Nach einigen Messungen konnte auf der unteren Messplatte, der kühleren Messplatte, kondensiertes Wasser festgestellt werden. Die maximale gemessene Feuchtigkeitszunahme ist 9,6 g Wasser, was auf ein Plattengewicht von rund 3700g einem Massenzuwachs von nur 0,26% entspricht. Dieser Massenzuwachs ist vernachlässigbar klein, da immer noch von einem ausgeglichenen Zustand der Holzplatte ausgegangen werden kann.

Zur Ermittlung des λ -Werts bei 10°C kann auf eine die durch die alte Norm DIN 52612-1 geforderte Dreifachmessung, verzichtet werden. Diese sah vor, eine Dreifachmessung von 10°C/20°C/30°C durchzuführen und mittels linearer Regression den λ_{10} -Wert zu berechnen. Da diese Messfolge ein stark lineares Verhalten aufweist, wie auch schon in [17] gezeigt, entspricht die Startmessung bei 10°C auf 0,06 mW(m·K) genau dem λ_{10} -Wert berechnet aus der Regression der Dreifachmessung. Die Reduktion von einer Dreifachmessung auf eine Einfachmessung führt zu einer deutlichen Beschleunigung der Wärmeleitfähigkeitsmessung. Die Messdauer reduziert sich um zwei Drittel von ca. 24 Stunden auf ca. 8 Stunden.

4.2 WÄRMEKAPAZITÄTSMESSUNG VON HOLZFASERDÄMMPLATTEN

4.2.1 MESSRESULTATE

Messung PAVABOARD mit Versuchsaufbau "λ-Meter EP500"

In dieser Messung wurde versucht, die spezifische Wärmekapazität von drei PAVABOARD-Platten im Einplatten-Wärmeleifähigkeitsmessgerät λ-Meter EP500 zu ermitteln. Die folgenden Randbedingungen wurden für die Messung definiert:

Material 3x PAVABOARD mit 20 mm Plattenstärke

Mitteltemperatur 14°C ΔT 14°C

Anpressdruck 2500 N/m²

In der Abbildung 4.4 (links) ist der durch Polynom-Regression 3. Grades berechneter Temperaturverlauf der Messwerte im Zeitraum von 0 min bis 200 min dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bedingt durch die gewählten Randbedingungen, die Temperatur an der Position 0,00 m über den ganzen Zeitraum bei 21°C konstant gehalten wird. Die Unterseite der Platte wird auf eine Temperatur von 7°C runtergekühlt. Zu Beginn der Messungen wird die Platte sehr schnell runtergekühlt, bis sich ein beinahe stationärer Zustand nach 200 min einstellt. Die Temperaturverläufe in der Platte haben zu Beginn starken Krümmungen und gehen mit der Zeit immer mehr in eine Gerade (Krümmung = 0) über. Dass sich ein stationärer Zustand einstellt, ist auch gut in der Abbildung 4.4 (rechts) erkennbar. Die Steigung der zeitlichen Temperaturverläufe nehmen mit zunehmender Zeit ab. Nach 200 min bleiben die Temperaturen konstant.

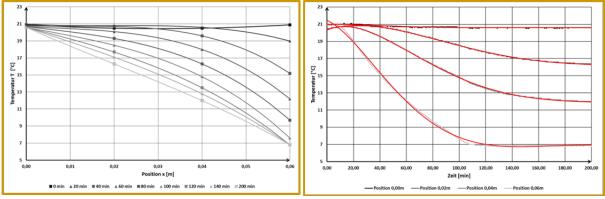


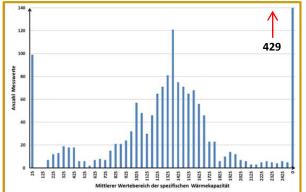
Abbildung 4.4: Berechneter Temperaturverlaufe in der Platte (rechts) und berechneter zeitlicher Temperaturverlauf an verschiedenen Positionen (links) [PAVABOARD, λ-Meter EP500]

Die roten Kurvenverläufe in Abbildung 4.4 zeigen die durch Polynom-Regression 6. Grades berechneten zeitlichen Temperaturverläufen im Vergleich zu den gemessenen zeitlichen Temperaturverläufen, in den Graustufen dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind die ermittelten Funktionen für die Positionen 0,00 m, 0,02 m und 0,04 m nicht schlecht gelungen. Die Funktion des zeitlichen Temperaturverlaufs an der Position 0,06 m ist hingegen nicht optimal. Im Bereich zwischen 0 min und 20 min sowie 100 min und 120 min ist die Kurve nur schlecht gefittet und entspricht somit nur ungenügend dem gemessenen Temperaturverlauf.

Da der Abkühlvorgang mit dem Einplatten-Wärmeleifähigkeitsmessgerät erfolgte, konnte die Wärmeleitfähigkeit direkt nach der Messung abgelesen werden. Bei den gegeben Randbedingung konnte eine Wärmleitfähigkeit von 0,0524 W/(m·K) gemessen werden. Die Rohdichte entspricht 248 kg/m³.

Durch Einsetzen der gemessenen Parametern in Gleichung (2.6) konnten die spezifischen Wärmekapazitäten berechnet werden. Die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität an den

Randpositionen lieferten sehr ungenaue bzw. keine plausiblen Messergebnisse. Diese ungenauen bzw. nicht plausiblen Messwerte sind durch das ungenügende Fitting des zeitlichen Kurvenverlaufs von Position 0,06 m und den verschwindend kleinen Krümmungen durch das Konstant halten der Temperatur an Position 0,00 m zu begründen. In Abbildung 4.5 sind die absolut berechneten Häufigkeit der spezifischen Wärmekapazitäten, eingeteilt in Wertebereichen von 50 J/(kg·K) dargestellt. In der Darstellung links, ist zu erkennen, dass die Verteilung einer Gausskurve ähnelt. Es sind jedoch sehr viele Ausreisser mit Werten von grösser als 2500 J/(kg·K) auszumachen. Werden nur die Resultate im Bereich mit einem grossen Temperaturunterschied betrachtet, wie im Zeitraum von 20 min bis 80 min, so werden alle Ausreisser eliminiert. Das Resultat ist eine deutlich erkennbare Gausskurve der Verteilung der berechneten spezifischen Wärmekapazitäten.



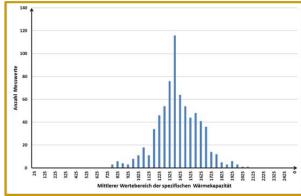


Abbildung 4.5: Verteilung der berechneten Messwerte der spezifischen Wärmekapazität-Werten über den ganzen Zeitraum von 0 min bis 200 min (links) und im ausgewählten Zeitraum von 20 min bis 80 min (rechts) [PAVABOARD, λ-Meter EP500]

Die statistische Auswertung der Messresultate der spezifischen Wärmekapazität im Zeitraum von 20 min bis 80 min hat folgende Grössen ergeben:

•	Mittelwert	1401 J/(kg·K)
•	Standardabweichung	205 J/(kg·K)
•	Median	1389 J/(kg·K)
•	0,25 – Quantil	1284 J/(kg·K)
•	0,75 - Quantil	1589 J/(kg·K)
	Maximum der Verteilung	1375 J/(kg·K)

Messung PAVABOARD mit Versuchsaufbau "Halogenstrahler"

In dieser Messung wurde versucht, die spezifische Wärmekapazität von drei PAVABOARD-Platten mit dem Versuchsaufbau "Halogenstrahler" zu ermitteln. Die Randbedingungen können bei diesem Versuchsaufbau nicht wie beim Versuchsaufbau mit dem Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät definiert werden. Die Randbedingungen sind folglich:

Material 3x PAVABOARD mit 20mm Plattenstärke

Mitteltemperaturnicht definierbarΔTnicht definierbarAnpressdrucknicht definierbar

In Abbildung 4.6 links wird ersichtlich, dass die Oberfläche bei $x = 0.00\,\mathrm{m}$ durch den Halogenstrahler von einer Ausgleichstemperatur von ca. 21°C auf über 100°C erhitzt wurde. Die Temperatur an Stelle $x = 0.06\,\mathrm{m}$ bleibt beinahe konstant. Der Temperaturverlauf in der Platte wurde mit einer Polynom-Regression 3. Grades ermittelt. Im Bereich des Plattenrandes bei $x = 0.06\,\mathrm{m}$ ist die Kurveneinpassung sicher nicht optimal, da die Kurvenverläufe eher asymptotisch Auslaufen sollten und nicht, wie in diesem Fall, eine Gegenkrümmung aufweisen sollen. In Abbildung 4.6 rechts ist der zeitliche Kurvenverlauf ersichtlich. Wie erkennt werden kann ist die Temperatur an der Oberfläche, bedingt durch konvektive Einflüsse, mit kleinen Amplituden am Schwanken. Die zeitlichen Temperaturverläufe, welche mit einer Polynom -Regression 6. Grades ermittelt wurden, zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Einzig die Oberflächentemperatur an Stele $x = 0.00\,\mathrm{m}$ hat im Anfangsbereich der Messungen gewisse Ungenauigkeiten.

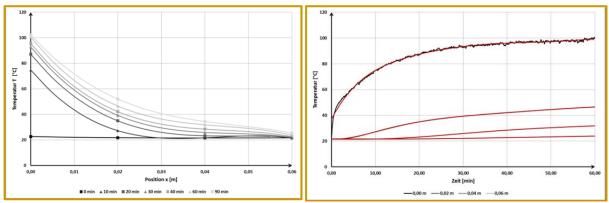
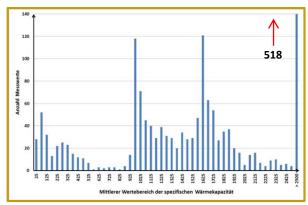


Abbildung 4.6: Berechneter Temperaturverlaufe in der Platte (rechts) und berechneter zeitlicher Temperaturverlauf an verschiedenen Positionen (links) [PAVABOARD, Halogenstrahler]

Für die Berechnung der spezifischen Wärmekapazitäten wurde der Wärmeleitfähigkeitsmesswert von 0,04855 W/(m·K) von einer nachträglich erstellten Wärmeleitfähigkeitsmessung übernommen. Die Rohdichte entspricht 248 kg/m³.

Durch Einsetzen der gemessenen Parametern in Gleichung (2.6) konnten die spezifischen Wärmekapazitäten berechnet werden. Da auch in diesem Fall die Messresultate der spezifischen Wärmekapazität an den Randzonen mit grossen Unsicherheiten, wie z.B. Verluste, behaftet sind, werden sie bei der Auswertung nicht berücksichtigt. In Abbildung 4.7 sind die absolut berechneten Häufigkeiten der spezifischen Wärmekapazitäten eingeteilt in Wertebereichen von 50 J/(kg·K) dargestellt. In der Darstellung links, ist zu erkennen, dass die Verteilung sehr gestreut ist. Auch sind mit 518 Messwerten mit einer spezifischen Wärmekapazität grösser als 2500 J/(kg·K) sehr viele Ausreisser auszumachen. Werden nur die Resultate im Bereich mit einem grossen Temperaturunterschied betrachtet, wie im Zeitraum von 30 min bis 70 min, so werden viele Ausreisser eliminiert. Die Streuung der Resultate hat sich somit ein wenig verringert, jedoch ist keine eindeutige Verteilung der berechneten spezifischen Wärmekapazitäten ersichtlich.



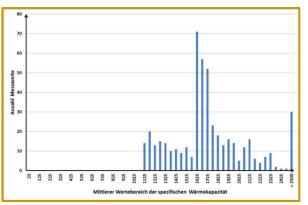


Abbildung 4.7. Verteilung der berechneten Messwerte der spezifischen Wärmekapazität-Werten über den ganzen Zeitraum von 0 min bis 150 min (links) und im ausgewählten Zeitraum von 30 min bis 70 min (rechts) [PAVABOARD, Halogenstrahler]

Die statistische Auswertung der Messresultate der spezifischen Wärmekapazität im Zeitraum von 30 min bis 70 min hat folgende Grössen ergeben:

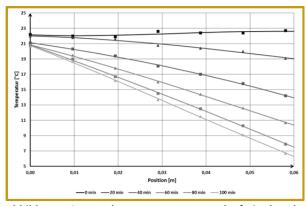
•	Mittelwert	1823 J/(kg·K)
•	Standardabweichung	754 J/(kg·K)
•	Median	1684 J/(kg·K)
•	0,25 – Quantil	1580 J/(kg·K)
•	0,75 - Quantil	1911 J/(kg·K)
•	Maximum der Verteilung	1625 J/(kg·K)

Messung von expandiertes Polystyrol EPS mit dem Versuchsaufbau "λ-Meter EP500"

In dieser Messung wurde versucht, die spezifische Wärmekapazität von sechs Platten aus expandiertem Polystyrol (EPS) im Einplatten-Wärmeleifähigkeitsmessgerät λ -Meter EP500 zu ermitteln. Diese Messung wurde dazu verwendet, das ganze Messverfahren an einem Dämmstoff mit einer geringeren temperatur- und feuchtigkeitsabhängigem Verhalten und allgemein bekanntem spezifischen Wärmekapazitäts-Werten zu überprüfen. Ausserdem hat dieser Dämmstoff den Vorteil, dass geringere Plattenstärken erhältlich sind und somit die Genauigkeit der Kurveneinpassung erhöht. Die folgenden Randbedingungen wurden für die Messung wurden definiert:

Material	6x Polystyrol EPS mit 10 mm Plattenstärke	
Mitteltemperatur	14°C	
ΔΤ	14°C	
Anpressdruck	2500 N/m ²	

In der Abbildung 4.8 sind die Temperaturverläufe in der Platte und über die Zeit ersichtlich. Die Kurveneinpassung wurden mittels Polynom-Regression 3. Grades bzw. mittels Polynom-Regression 6. Grades durchgeführt. Im linken Bild wird ersichtlich, dass die Kurveneinpassung ab 40 min nach Messbeginn an Genauigkeit zunimmt. Die Regression des zeitlichen Temperaturverlaufes, dargestellt im rechten Bild, ist erneut sehr genau.



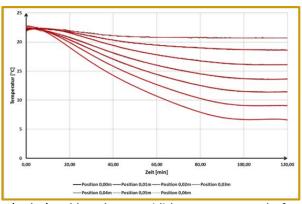
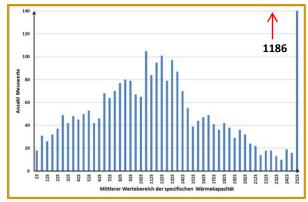


Abbildung 4.8: Berechneter Temperaturverlaufe in der Platte (rechts) und berechneter zeitlicher Temperaturverlauf an verschiedenen Positionen (links) [EPS, λ-Meter EP500]

Da der Abkühlvorgang mit dem Einplatten-Wärmeleifähigkeitsmessgerät erfolgte, konnte die Wärmeleitfähigkeit direkt nach der Messung abgelesen werden. Bei den gegeben Randbedingung konnte eine Wärmleitfähigkeit von 0,0357 W/(m·K) gemessen werden. Die Rohdichte ist mit 16,78 kg/m³ deutlich kleiner als die Dichte der Holzfaserdämmplatten.

Durch Einsetzen der gemessenen Parametern in Gleichung (2.6) konnten die spezifischen Wärmekapazitäten berechnet werden. Wie bei den anderen Messauswertungen wurden die Messwerte der Randzonen nicht berücksichtigt. In Abbildung 4.5 sind die berechneten absoluten Häufigkeiten der spezifischen Wärmekapazitäten, eingeteilt in Wertebereichen von 50 J/(kg·K) dargestellt. In der Darstellung links, ist zu erkennen, dass die Verteilung beinahe dreieckförmig ist. Jedoch sind sehr viele Ausreisser mit Werten von grösser als 2500 J/(kg·K) auszumachen. Ein Blick in die Berechnungen zeigt, dass die Ausreisser hauptsächlich von der Position x = 0,01 m herkommen. Wird der Messdatenbereich auf Zeitraum zwischen 20 min und 80 min, in welchem die Temperaturverläufe gut gefittet werden konnten, beschränkt und die Messwerte der Position x = 0,01 m vernachlässigt, so werden beinahe alle Ausreisser eliminiert. Die Verteilung des reduzierten Messdatenbereich, in Abbildung 4.9 rechts dargestellt, hat sich deutlich verändert.



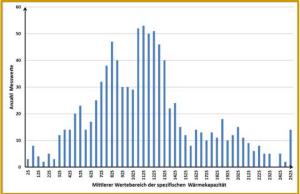


Abbildung 4.9: Verteilung der berechneten Messwerte der spezifischen Wärmekapazität-Werten über den ganzen Zeitraum von 0 min bis 120 min (links) und im ausgewählten Zeitraum von 40 min bis 80 min (rechts) [EPS, λ-Meter EP500]

Die statistische Auswertung der Messresultate der spezifischen Wärmekapazität im Zeitraum von 40 min bis 80 min hat folgende Grössen ergeben:

•	Mittelwert	1161 J/(kg·K)
•	Standardabweichung	531 J/(kg·K)
•	Median	1124 J/(kg·K)
•	0,25 – Quantil	805 J/(kg·K)
•	0,75 – Quantil	1397 J/(kg·K)
	Maximum der Verteilung	1125 I/(kg·K)

Messungen holzFlex® protect mit dem Versuchsaufbau "λ-Meter EP500"

Die erste Differenztemperaturmessung wurde mit dem Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät durchgeführt und hatte folgende Randbedingungen:

Material	holzFlex® protect mit 60mm Plattenstärke
Mitteltemperatur	20°C
ΔΤ	10°C
Anpressdruck	2500 N/m ²

Die Messfühler wurden mit dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Verfahren in die Holzfaserdämmplatte eingebracht. Durch die falsche Positionierung der Messfühler im Randbereich, konnte bei der Auswertung die Positionen der anderen Messfühler nicht genau berechnet werden. Eine Berechnung der spezifischen Wärmekapazität konnte somit nicht durchgeführt werden.

Messungen holzFlex® protect mit dem Versuchsaufbau "Halogenstrahler"

Es wurde eine weitere Differenztemperaturmessung mit der Holzfaserdämmplatte holzFlex® protect durchgeführt. Die Oberfläche der Platte wurde, wie in Kapitel 3.2 erläutert, mit dem Halogenstrahler erhitzt. Nach ca. 30 min Bestrahlung hatte sich die Randzone der Platte bis auf 113°C erhitzt. Aus sicherheitstechnischen Gründen wurde auf eine längere Erhitzung der Oberfläche verzichtet und die Wärmequelle abgeschaltet. Da sich bis zu diesem Zeitpunkt kein stationärer Zustand der Wärmeleitung eingependelt hat, konnte die Positionsbestimmung der inneren Messfühler erneut nicht durchgeführt werden.

4.2.2 VERGLEICH DER MESSRESULTATE MIT LITERATURWERTEN

Die spezifische Wärmekapazitätsmessung der Holzfaserdämmplatte PAVABOARD mit den beiden Versuchsaufbauten, hat zu unterschiedlichen Messergebnissen geführt. Werden die Messergebnisse, dargestellt in Tabelle 4.4, miteinander verglichen, so kann folgendes festgestellt werden:

- Mit dem Versuchsaufbau "λ-Meter EP500" wurden generell tiefere spezifische Wärmekapazitäten gemessen.
- Die Mittelwert unterscheiden sich mit 422 J/(kg·K) deutlich voneinander.
- Die Standardabweichung der Messungen mit dem Versuchsaufbau "Halogenstrahler" ist um einiges höher, als jene Messungen mit dem Versuchsaufbau "λ-Meter EP500".
- Der Median der beiden Versuchsaufbauten unterscheiden sich mit 295 J/(kg·K).
- Die Lage der Maxima der Verteilung der beiden Versuchsaufbauten unterscheiden sich um 250 J/(kg·K).

Tabelle 4.4: Vergleich der spezifischen Wärmekapazität c [J/(kg·K)] der PAVABOARD-Platten

	"λ-Meter EP500"	"Halogenstrahler"
Mittelwert	1401	1823
Standardabweichung	205	754
Median	1389	1684
0,25 - Quantil	1284	1580
0,75 - Quantil	1589	1911
Maximum der Verteilung	1375	1625

Ein Vergleich der gemessenen spezifischen Wärmekapazitäten mit dem Wert aus dem Produktedatenblatt der Holzfaserdämmplatte PAVABOARD zeigt, dass die gemessenen Werte deutlich tiefer

liegen. Im Produktedatenblatt wird für die spezifische Wärmekapazität einen Wert von 2100 J/(kg·K) angegeben.

Mit der Gleichung (2.17) bzw. (2.18) kann die spezifische Wärmekapazität für Holz und Holzwerkstoffe in Abhängigkeit des Feuchtigkeitsgehalts und der Temperatur berechnet werden. Für Holzfaserdämmplatten mit Lagerung im Klima von 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit kann gemäss [17] ein Feuchtigkeitsgehalt u von 10% angenommen werden. Die mittlere Temperatur während der Messung mit dem Versuchsaufbau " λ -Meter EP500" betrug ca. 14°C und mit dem Versuchsaufbau "Halogenstrahler" gemittelt über den betrachteten Messbereich ca. 35°C. Durch einsetzen dieser Randbedingungen in die Gleichungen (2.17) und (2.18) berechnen sich die in der Tabelle 4.5 aufgeführten spezifische Wärmekapazitätswerte.

Verglichen mit den Literaturwerten liegt der Messwert mit dem Versuchsaufbau " λ -Meter EP500" über dem Tabellenwert von Lignum, jedoch tiefer als die anderen Literaturquellen. Der Messwert kommt dem Literaturwert nach Gleichung (2.18) schon sehr nahe. Der Messwert mit dem Versuchsaufbau "Halogenstrahler" liegt in der Grössenordnung des Messwerts nach Kollman aus [9] in [10].

Tabelle 4.5: Literaturwerte für spezifische Wärmekapazität bei den entsprechenden Randbedingungen

Spezifische Wärmkapazität [J/(kg·K)	"λ-Meter EP500"	"Halogenstrahler"
nach Gleichung (2.17)	1543	1968
nach Gleichung (2.18)	1479	1553
nach Lignum mit u≈ 6-8 [18]	1046-1255	1046-1255
nach Kollmann [9]	≈1650	≈1650

Die gemessene spezifische Wärmekapazität der expandierten Polystyrol-Platten von ca.1150 J/(Kg·K) liegt nur gering tiefer als der in [16] aufgeführten Wert von ca. 1250 J/(Kg·K) für Polystyrol. Da jedoch auch für Polystyrol sehr unterschiedliche Literaturwerte gefunden wurde, die sich zwischen 1200 und 1600 J/(Kg·K) bewegen, ist auch hier keine Aussage über die Güte der Messung möglich.

4.2.3 VERGLEICH DER VERSUCHSAUFBAUTEN

Zum Herbeiführen des benötigten Temperaturgradienten in den Holzfaserdämmplatten wurden, wie in Kapitel 3.2 erläutert, zwei verschiedene Versuchsaufbauten getestet. Zum einen wurde der Temperaturgradient in den Platten mit dem Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät erzeugt, zum andern wurde ein Halogenstrahler mit einer Leistung von 150 Watt als Wärmequelle eingesetzt. Während diversen Messungen konnten viele Plus- bzw. Negativpunkte der beiden Versuchsaufbauten festgestellt werden.

Die Messung mit dem Einplatten-Wärmleitfähigkeitsmessgerät hat den Vorteil, dass gleichzeitig zur Temperaturmessung auch eine Wärmeleitfähigkeitsmessung bei den eingestellten Randbedingungen durchgeführt wird. Weiter wird durch diesen Versuchsaufbau garantiert, dass sich in der Platte eine eindimensionale, stationäre Strömung einstellen kann. Nebeneffekte oder externe Einflüsse werden durch die Schutzheizung des Messgerätes minimiert oder eliminiert. Mit der Gleichung (2.9) und den bekannten Temperaturen beim Einpendeln des eindimensionalen, stationären Zustands in der Holzfaserdämmplatte, kann durch auflösen nach x, die Positionen der verschiedenen Messfühler berechnet werden. Der einzige erkennbare Nachteil der Messungen mit dem Einplatten-Wärmleitfähigkeitsmessgerät ist, dass der maximale einstellbare Temperaturgradient mit $\Delta T = 15$ °C relativ niedrig ist. Durch aufbringen eines höheren Temperaturgradienten können bessere Kurvenfittings berechnet werden, was zu genaueren Messresultaten führt.

Für den Aufbau mit dem Halogenstrahler verhalten sich die Pro- und Kontras gegensätzlich zum Versuchsaufbau mit dem Einplatten-Wärmleitfähigkeitsmessgerät. So kann die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nicht gleichzeitig mit den Temperaturmessungen erfolgen. Die für die Berechnungen

der spezifischen Wärmekapazität benötigte Wärmeleitfähigkeit muss entweder vorgängig oder nachträglich separat mit dem Einplatten-Wärmleitfähigkeitsmessgerät bei nicht denselben Bedingung wie bei den Temperaturmessungen durchgeführt werden. Aufgrund der anderen Randbedingungen resultiert, bedingt durch die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit, eine andere gemessene Wärmeleitfähigkeit als bei den Temperaturmessungen wirklich vorhanden. Weiter nachteilig ist, dass es sehr lange dauert bis sich ein stationärer Zustand einstellen wird bzw. dieser stationäre Zustand gar nicht erreicht wird. Eine nachträgliche Bestimmung der Positionen der Messfühler ist somit nur schwer möglich bzw. nicht möglich (vgl. Kapitel 4.2.1). Ein weiteres Problem ist, dass bedingt durch den Versuchsaufbau keine eindimensionale Wärmeleitung garantiert werden kann. Findet eine dreidimensionale Wärmeleitung in der Platte statt, was sehr wahrscheinlich ist, so müssten die Berechnungen dreidimensional durchgeführt werden, damit korrekte Resultate erzielt werden können. Der einzige Vorteil dieses Versuchsaufbaus mit dem Halogenstrahler ist, dass hohe Temperaturgradienten in der Platte erzielt werden können. Die Temperaturverläufe werden somit deutlicher und können genauer gefittet werden.

4.2.4 EMPFEHLUNGEN FÜR DEN VERSUCHSAUFBAU

Mit den gewonnen Erkenntnissen der verschiedenen Messungen können folgende Empfehlung für den Versuchsaufbau zur Messung der spezifischen Wärmekapazität mittels Differenztemperaturmessung vorgeschlagen werden:

- Die Temperaturmessung ist aufgrund der in Kapitel 0 erläuterten Gründe am geeignetsten mit einem Einplatten-Wärmleitfähigkeitsmessgerät durchzuführen.
- Der Temperaturgradienten soll immer grösstmöglich gewählt werden, damit deutliche Temperaturkurvenverläufe entstehen. Deutliche Temperaturkurven erleichtern das Fitting der Kurvenverläufe und reduzieren die Messungenauigkeiten.
- Die Temperatur einer Oberflächenseite der Probe sollte möglichst konstant bei der Plattentemperatur aus dem Ausgleichszustand gehalten werden. Somit kann eine einseitige Erhitzung oder Abkühlung simuliert werden, welche sich viel einfacher Fitten lässt, als wenn beide Oberflächen eine Temperaturveränderung erfahren. Je genauer die Messfühler, desto genauer können die Temperaturverläufe gefittet werden.
- Eine möglichst genaue Kenntnis über die Positionen der Messfühler ist erforderlich. Durch das Erreichen eines stationären Zustands in Einplatten-Wärmleitfähigkeitsmessgerät kann eine nachträgliche Berechnung der Position erfolgen, wenn die Randtemperaturen eindeutig bekannt sind. Wenn möglich sollten die Positionen der Messfühler schon vor der Messung möglichst genau bekannt sein. Eine nachträgliche Berechnung ist immer mit Unsicherheiten behaftet.
- Je höher die Genauigkeit der Temperaturmessungen sind, desto besser können die Kurvenverläufe gefittet werden. Die Verwendung von auf den hundertstell genauen Temperaturmessfühler ist zu empfehlen.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSSICHT

Die Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität von Holzfaserdämmplatten haben mit aller Deutlichkeit aufgezeigt, dass die Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen und deren Messungen durch viele Faktoren beeinflusst werden. Neben den werkstoffseitigen Einflussfaktoren wie Rohdichte, Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur, hat die Messmethode und deren Randbedingungen selbst einen grossen Einfluss auf das Ergebnis der Messungen.

Bezüglich des Einflusses des Anpressdrucks auf die Wärmeleitfähigkeit konnte gezeigt werden, dass mit steigendem Druck, die Wärmeleitfähigkeit abnimmt. Da diese Aussage nicht auf ein werkstoffseitiges Verhalten der Holzfaserdämmplatten zurückzuführen ist, muss angenommen werden, dass während der Messung prüfmethodenseitige Effekte zu diesen Verhalten geführt haben. Die abnehmende Wärmeleifähigkeit ist darin zu begründen, dass durch den ungenügenden Kontakt zwischen der Heizplatte und der Oberfläche, bedingt durch die niedrigen Anpressdrücke, Verluste entstanden. Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass zukünftige Messungen mit dem Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät trotz zum Teil grosser Verdichtung immer mit dem maximal erlaubten Anpressdruck durchgeführt werden sollen.

Bei den Untersuchungen bezüglich des Einfluss der Messmethode auf die Wärmeleifähigkeit konnte gezeigt werden, dass die Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmplatten stark temperaturabhängig sind. Mit steigender Temperatur nimmt die Wärmeleitfähigkeit ab. Weiter konnte nachgewiesen werden, dass die Startmessung einer Dreifachmessung jeweils einer Einzelmessung gleichkommt. Die Startmessungen wiesen zudem immer höhere Wärmeleifähigkeiten auf, als wenn die Wärmeleitfähigkeitsmessung, bei gleicher Temperatur, über einen Temperaturpfad erfolgte.

Zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität mittels Differenztemperaturmessung wurden zwei Versuchsaufbauten realisiert und getestet. Es konnte gezeigt werden, dass die Durchführung der Messungen im Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgerät deutliche Vorteile besitzt. Die Erwärmung der Holzfaserdämmplatte mit dem Halogenstrahler hat sich als wenig geeignet erwiesen. Die wesentlichen Vorteile des Versuchsaufbaus im Einplatten-Wärmeleitfähigkeitsmessgeräts sind, dass die Nebeneinflüsse durch die Schutzmechanismen des Geräts minimiert werden können, dass sich ein eindimensionales stationäres Temperaturfeld in sehr kurzer Zeit einstellen kann und dass die für die Berechnung benötigte Wärmeleitfähigkeit direkt mit der Differenztemperaturmessung und unter den gleichen Bedingungen erfolgen kann. Beim Versuchsaufbau mit dem Halogenstrahler muss die Wärmeleitfähigkeitsmessung entweder vorgängig oder nachträglich unter anderen Temperaturbedingungen ermittelt werden. Da die Temperatur jedoch einen grossen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat, entstehen grosse Unsicherheiten.

Die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität durch Auswertung der Differenztemperaturmessung haben plausible Resultate ergeben, die im Bereich der Literaturwerte einzuordnen sind. Jedoch fällt bei Betrachtung der Literaturwerte auf, dass die angegebenen Werte für die spezifische Wärmekapazität stark streuen. Wie verlässlich jedoch die gemessenen Resultate der spezifischen Wärmekapazität schlussendlich sind, konnte nicht gezeigt werden.

In zukünftigen Arbeiten von wissenschaftlichem und technischem Interesse kann das Verfahren und der Versuchsaufbau zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität mittels Differenztemperaturmessung weiter verbessert werden. So kann z.B. durch die Erhöhung der Anzahl Messfühler in der Probe, die Genauigkeit der Temperaturverläufe im Plattenquerschnitt und somit auch die Genauigkeit der Messresultate verbessert werden. Auch gilt es zu untersuchen, wie verlässlich die Messresultate in Wirklichkeit sind. Dies kann z.B. durch eine genauere statistische Analyse oder durch Untersuchung von Materialien mit bekannten und nicht so stark variablen spezifischen Wärmekapazitäten erfolgen. Ein ganz anderer Ansatz könnte sein, dass die durch die Differenztemperaturmessung ermittelten spezifischen Wärmekapazitäten von Holzfaserdämmplatten mit einem anderen Messverfahren, wie z.B. die Kalorimetrie, verglichen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] M. Hegger, V. Auch-Schwelk, M. Fuchs und T. Rosenkranz, Baustoff Atlas, München: Birkhäuser Verlag fürch Architektur, 2005.
- [2] «WECOBIS Ökoligisches Baustoffinformationssystem,» [Online]. Available: http://www.wecobis.de/jahia/Jahia/Home/Bauproduktgruppen/Daemmstoffe/aus_nachwac hsenden_Rohstoffen/Holzfaserdaemmplatten. [Zugriff am 12 Dezember 2012].
- [3] Verband Holzfaser Dämmstoffe e.V. (VHD), «Holzfaser.org,» [Online]. Available: http://www.holzfaser.org/holzfaserdaemmstoffe/herstellung.php. [Zugriff am 18 Dezember 2012].
- [4] D. Krug, «Einfluss der Faserstoff-Aufschlussbedingungen und des Bindemittels auf die Eigenschaften von mitteldichten Faserplatten (MDF) für eine Verwendung im Feucht- und Außenbereich,» Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, der Universität Hamburg, Dresden, 2010.
- [5] Pavatex SA, «pavatex.ch,» [Online]. Available: http://www.pavatex.ch/Portals/0/content/Dokumente/Herstellung.pdf. [Zugriff am 18 Dezember 2012].
- [6] S. Senf, A. Bramkamp und M. Wangelin, «Baunetz Wissen Dämmstoffe,» Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., 2010. [Online]. Available: http://www.baunetzwissen.de/index/Daemmstoffe_558.html. [Zugriff am 17 Dezember 2012].
- [7] «Wikipedia,» 2012. [Online]. Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Temperaturleitf%C3%A4higkeit. [Zugriff am 17 Dezember 2012].
- [8] P. Häupl, «Wärme,» in *Bauphysik: Klima, Wärme, Feuchte, Schall*, Berlin, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co., 2008, pp. 63-85.
- [9] F. Kollmann, Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Erster Band: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit, Bde. %1 von %2Erster Band: Anatomie und Pathologie, Chemie, Physik, Elastizität und Festigkeit, Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag, 1951.
- [10] P. Ziemz, Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, Leinfelden-Echterdingen: DRW-Verlag, 1993.
- [11] A. P. Schniewind, Concise encyclopedia of wood & wood-based materials, Pergamon Press, 1993.
- [12] P. Niemz, W. Sonderegger, H. Bader und A. Weber, «Wärmeleitfähigkeit mehrlagiger Massivholzplatten und weiterer Holzwerkstoffe,» *holztechnologie*, Nr. 5, pp. 23-28, 2007.
- [13] W. Simpson und A. TenWolde, «Physical Properties and Moisture Relations of Wood,» in Wood handbook—Wood as an engineering material., U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999.
- [14] M. Holznagel, Erarbeitung eines Rechenprogramms für den instationären Wärmetransport durch mehrschichtige Bauteile, Berlin: Fachhochschu für Technik und Wirschaft Berlin, 1999.

- [15] Lambda Messtechnik GmbH, «http://www.lambda-messtechnik.de,» [Online]. Available: http://www.lambda-messtechnik.de/waermeleitfaehigkeitsmessgeraet-lambda-meter-ep500e/ep500e-aufbau-funktion.html. [Zugriff am 18 Dezember 2012].
- [16] «Styrolution.net,» [Online]. Available: http://www.styrolution.net/wa/steu~de_DE/portal/show/common/content/products/styre nics/polystyrol/thermal_properties_polystyrene. [Zugriff am 20 Dezember 2012].
- [17] F. Michel, «Bestimmung bauphysikalisch relevanter Eigenschaften bei Meterialkombination von porösen Holzfaserplatten und anderen Materialien,» Biel, 2012.
- [18] B. Braune und V. Würgler, Dokumentation Holz, Zürich: LIGNUM, 1960.
- [19] H. Schreck, «Das wohltemperierte Haus,» 1982. [Online]. Available: http://www.das-wohltemperierte-haus.info/waer_spei.htm. [Zugriff am 28 September 2012].