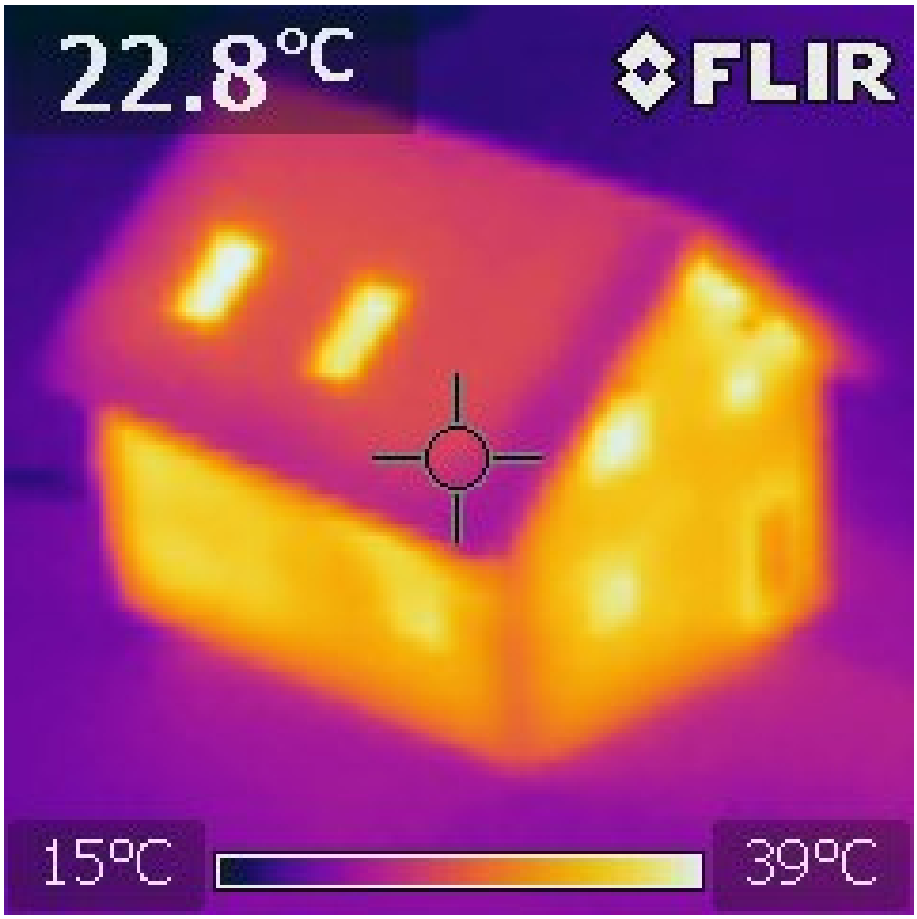
Bundesumweltwettbewerb 2014

Laub – Dämmstoff der Zukunft?

Agnes Stockinger (17)
Barbara Stockinger (15)
Felix Weiß (17)

Chiemgau-Gymnasium Traunstein



Vorwort

Wir möchten uns ganz herzlich bei der Firma Haidenhein in Traunreut für die Herstellung der für unsere Arbeit benötigten Aluminiumwürfel bedanken. Des Weiteren gilt unser Dank auch dem Sponsorpool Bayern für die Finanzierung der Wärmebildkamera und unserer Schulleitung für die Finanzierung des Modellhauses. Last but not least möchten wir uns recht herzlich bei unserem Betreuungslehrer Hr. Götzinger und bei Fr. Schubert für ihren fachlichen Rat bedanken. Ohne die große Unterstützung aller wäre unser Projekt nicht in einem so großen Spektrum umsetzbar gewesen.

Teile dieser Projektarbeit sendeten wir bereits bei dem „Schülerwettbewerb der Siemens Stiftung 2014“ und andere Teile bei „Jugend Forscht 2013/2014“ ein.

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzfassung ……3
2. Problematik Dämmstoffe ……3
   2.1 Frühere Dämmstoffe ……3
   2.2 Heutige Dämmstoffe ……4
3. Zielsetzung ……8
4. Theoretisch Grundlagen zum Dämmverhalten von Stoffen ……8
5. Praktische Versuche……9
   5.1 Ziele und Versuchsaufbau……9
   5.2 Allgemeine Vorgehensweise……10
   5.3 Versuche mit verschiedenen nachhaltigen Materialien ……13
      5.3.1 Messergebnisse……13
      5.3.2 Auswertung der Messergebnisse ……14
      5.3.3 Vergleich mit recherchierten λ-Werten ……15
      5.3.4 Vergleich mit weiteren herkömmlichen Baustoffen ……16
   5.4 Versuche mit unterschiedlichem Wasseranteil ……16
6. Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse ……19
7. Optimierung der Dämmeigenschaften und Lösungen für die Nachteile von Laub als Dämmstoff ……19
   7.1 Optimierung der Dämmeigenschaften……19
      7.1.1 Ergebnisse ……20
      7.1.2 Auswertung der Messergebnisse ……21
   7.2 Aspekt der Schalldämmung ……22
   7.3 Lösung der Nachteile von Laub als Dämmstoff ……23
      7.3.1 Schlechte Feuchtigkeitsresistenz als grundsätzliche Ursache ……23
      7.3.2 Schafwolle als Lösung ……24
8. Die optimalste Kombination der Dämmstoffe ……25
   8.1 Die Fassadendämmung ……25
   8.2 Die in den Ziegelstein integrierte Dämmung ……26
   8.3 Die Dachdämmung ……27
9. Versuche an einem eigens gebauten Modellhaus ……28
10. Die Nachhaltigkeit des Dämmmaterial Laubs ……29

10.1 Vorteile im Bereich Nachhaltigkeit du Umweltfreundlichkeit ……31

10.2 Mögliche Risiken einer intensiven Laubnutzung …….32

11. Fazit ……32

12. Quellenangaben ……32

Anhang

I. Bilder

II. Tabellen

III. Bau des Modellhauses

IV. Forschungstagebuch

1. Kurzfassung

Durch die energetische Sanierung unserer Schule und einiger anderer Häuser in der näheren Umgebung kamen wir in den ersten Kontakt mit der Problematik von früheren und heutigen Dämmstoffen. Daraufhin stellten wir uns die Frage, ob es nicht möglich wäre mehr mit umweltfreundlichen und nachhaltigen Dämmstoffen zu dämmen. Wir verfolgten diesen Ansatz immer weiter, bis daraus ein konkretes Konzept zur Erforschung umweltfreundlicher Dämmstoffe wurde. Am Ende dieses ersten Projektteils, nach der Auswertung unserer eigenen Ergebnisse und einer aufwendigen Recherche erkannten wir das große ungenutzte Potential des Rohstoffs Laub. Laub eignet sich hervorragend zur Wärmedämmung von Gebäuden und bietet auch große wirtschaftliche und ökologische Vorteile. Deshalb setzten wir uns nun das Ziel Laub als Dämmstoff weiter zu optimieren, dessen Nachteile zu beseitigen, um am Ende ein Konzept zur Umsetzung unserer Ergebnisse im industriellen Maßstab zu entwerfen.

2. Problematik Dämmstoffe

Energetische Sanierungen boomen gerade, auch unsere Schule - ein Altbau aus den 1970/80er Jahren - wurde 2011 energetisch saniert, und im Zuge dessen neu eingedämmt. Zur neuen Dämmung wurde Mineralwolle verwendet. Kurze Zeit zuvor war ein Gebäude gegenüber der Schule neu eingedämmt worden, dieses Gebäude war früher mit asbesthaltigen Dämmstoffen gedämmt worden, was nun ein großes Problem darstellte. Durch diese Ereignisse an und um unsere Schule wurden wir schließlich auf die gesundheitliche und ökologische Problematik von Dämmstoffen aufmerksam und begannen uns intensiv über Dämmstoffe zu informieren.

2.1 Frühere Dämmstoffe

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts verwendete man zur Gebäudedämmung hauptsächlich Mineralwolle und aus Erdöl gewonnene Dämmstoffe (Styrodur, Styropor, etc.). Häufig wurden diesen Dämmstoffen noch zusätzliche Stoffe, wie zum Beispiel Asbest zugesetzt. Aufgrund der Eigenschaften der Dämmstoffe und der zugesetzten Stoffe ergibt sich heute ein immer größeres Entsorgungsproblem. Stoffe, die Asbest enthalten, können nicht einfach auf einer Mülldeponie entsorgt werden, sondern müssen zuerst sicher verschlossen werden und auf den Mülldeponien speziell zwischen mineralischen Stoffen eingelagert werden, damit keine Asbest-Faser in die Luft und den Nahrungskreislauf gelangen können.

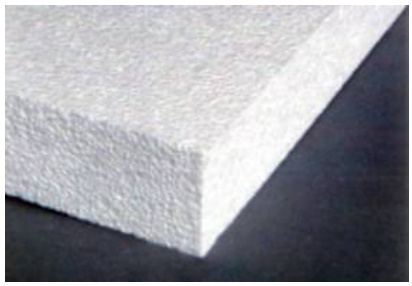
2.2 Heutige Dämmstoffe

Alle heutzutage gebräuchlichen Dämmmaterialien lassen sich ziemlich gut in drei Gruppen einteilen:

1. **Heute überwiegend genutzte Dämmstoffe** (z.B. Polystyrol, Mineralwolle, Perlit)
2. **Heute gebräuchliche nachhaltige Dämmstoffe** (z.B. Holzfaser, Zellulose, Schafwolle)
3. **Mögliche zukünftige Dämmstoffe** (z.B. Aerogel, Vakuumdämmplatten)

Heute überwiegend genutzte Dämmstoffe

Die meisten dieser Dämmstoffe werden synthetisch aus Erdöl hergestellt. Zum Einen ist das nicht besonders umweltfreundlich, da Rohöl meistens erst einmal sehr weite Strecken per Schiff zurücklegt, und zum Anderen entsteht bei der Weiterverarbeitung zu Polystyrol oder Polyurethan sehr viel CO_2. Gängige Alternativen zu solchen organischen Dämmmaterialien sind im Moment Mineralwolle und Perlit. Mineralwolle kann aus mehreren verschiedenen Stoffen hergestellt werden. Meistens jedoch aus Glas (Glaswolle) oder Dolomitgestein (Steinwolle). Wie die organischen Dämmstoffe hat Mineralwolle einen sehr hohen Primärenergiegehalt, was sich auf die Energiebilanz dieses Dämmstoffs negativ auswirkt. Zusätzlich ist anzumerken, dass bestimmte Arten von Mineralwolle im Verdacht stehen krebserregend zu sein. Perlit ist das wohl zurzeit umweltfreundlichste Dämmmaterial, aber dafür leider relativ teuer. Perlit wird hauptsächlich aus Vulkangestein hergestellt, wodurch auch oft lange Transportwege nötig sind.



Expandiertes Polystyrol (Styropor)

Mineralwolle

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die großen Stärken der heute gängigen Dämmmaterialien ein durchwegs niedriger Preis und eine starke Brandresistenz sind, denn weder synthetische Dämmstoffe, noch Mineralwolle oder Perlit brennen. Allerdings muss unbedingt noch die Energie, die zur Herstellung von den Dämmmaterialien nötig ist, verringert werden, denn es ist ökologisch unsinnvoll, wenn für die Herstellung und den Transport einer Dämmung mehr Energie gebraucht wird, als die Dämmung selbst letztendlich einspart.

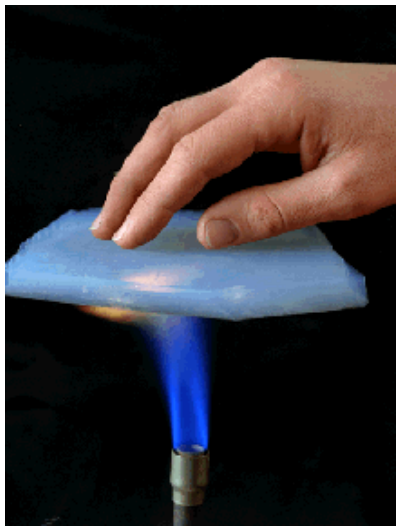
Heute gebräuchliche Nachhaltige Dämmstoffe

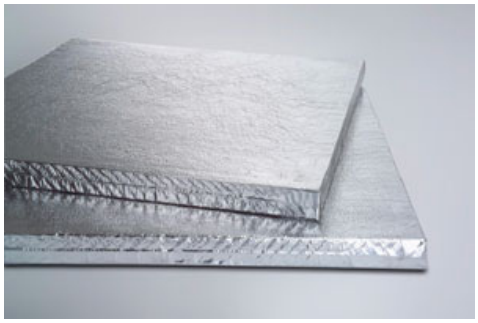
Die heute hauptsächlich verwendeten nachhaltigen Dämmstoffe sind Holzspäne, Zellulose und Schafwolle. Diese nachhaltigen Dämmstoffe werden aus pflanzlichen Rohstoffen hergestellt und sind somit fast unbegrenzt verfügbar. Der Energieaufwand zur Herstellung ist bei diesen Dämmstoffen sehr gering. Die großen Nachteile sind bei allen nachhaltigen

Dämmmaterialien dieselben, nämlich, dass sie brennbar sind, schnell verrotten und Wasser gut aufnehmen.

Mögliche zukünftige Dämmstoffe

Zwei mögliche zukünftige Dämmstoffe sind Aerogel (Bild rechts oben) und Vakuumdämmplatten (Bild rechts unten), diese Wärmedämmungen werden zwar heutzutage schon eingesetzt, aber nur in sehr begrenzten Fällen. Aerogel ist ein aus Kohlenstoffverbindungen bestehendes Dämmmaterial, mit einer außergewöhnlich niedrigen Wärmeleitzahl und zudem einer sehr geringen Dichte. Außerdem ist Aerogel nicht brennbar. Dafür steht Aerogel wie Mineralwolle im Verdacht krebserregend zu sein. Trotz seinen außergewöhnlichen Eigenschaften wird Aerogel zumindest im Hausbau heutzutage noch nicht verwendet, aus dem einfachen Grund, dass sich eine Anwendung bei einem Preis von 100-200 $\frac{€}{m^2}$ niemals rentieren kann. Eine andere Alternative sind Vakuumdämmplatten, die noch einmal deutlich besser dämmen als Aerogel. Allerdings sind sie ebenfalls mit einigen 500-1500 $\frac{€}{m^2}$ [3] noch unrentabel für den Hausbau. Das große Problem bei Vakuumdämmplatten ist im Moment auch noch, dass sie diese gute Wärmedämmung nur eine sehr kurze Zeit leisten können, da in das Vakuum nach und nach Luft eindringt und somit die Wärmeleitfähigkeit erhöht. Bisher reicht die Lebenserwartung von solchen Vakuumdämmplatten je nach Verarbeitung von einigen Monaten bis zu wenigen Jahrzehnten.





Um die einzelnen Dämmstoffe noch besser vergleichen zu können, erstellten wir folgende Übersicht:

	Material	Preis in $\frac{€}{m^2}$	Dichte in $\frac{kg}{m^3}$	λ -Wert	Baustoff-klasse	Energieaufwand in $\frac{MJ}{m^3}$	Gesundheitliche Risiken	Besonderheiten
Heute überwiegend genutzte Dämmstoffe	**Expandiertes Polystyrol**	10 [2]	15-30 [1]	0,035-0,040 [1]	B1 [1]	1440-2880 [1]	bei Brand, giftige Abbauprodukte und Gase	relativ stabil, Erdölprodukt
	Polyurethan	18 [2]	15-250 [1]	0,030-0,035 [1]	B1-B2 [1]	3060 [1]	bei Brand giftige Abbauprodukte	relativ stabil, Erdölprodukt
	Mineralwolle	9-21 [2]	15-250 [1]	0,035-0,045 [1]	A1, A2, B1 [1]	471-3280 [1]	mögl. krebserregend	-
	Perlite	20-45 [2]	90-490 [1]	0,045-0,070 [1]	A1, B2 [1]	930 [1]	keine	Perfekt als Bodendämmung
Heute gebräuchliche nachhaltige Dämmstofffe	**Schafwolle**	5-50 [2]	20-80 [1]	0,040 [1]	B2 [1]	410-1066 [1]	Insekten, Pilze bei Feuchtigkeit	nachwachsend
	Zellulosefaser	18-21[2]	30-80 [1]	0,040-0,045 [1]	B2 [1]	106-256 [1]	nur bei Behandlung	nachwachsend
	Holzfaser-dämmplatte	40 [2]	130-450 [1]	0,040-0,060 [1]	B2 [1]	1800-2400 [1]	keine	nachwachsend
Mögliche zukünftige Dämmstoffe	**Aerogel**	100-200	50-100 [20]	0,013-0,018	A1	k.A.	möglicherweise krebserregend	sehr hohe Stabilität
	Vakuum-dämmplatte	500-1500 [3]	160 [2]	0,0010-0,0060 [2]	A2 [2]	vermutlich mehrere 1000	keine	kurze Lebensdauer

Bei dem Preis in $\frac{€}{m^2}$ wird immer davon ausgegangen, dass eine 0,1 m dicke Schicht des Dämmmaterials gebraucht wird.
k.A.: keine Angabe

3. Zielsetzung

Da wir uns mit der Problematik aktueller Dämmstoffe beschäftigt und informiert hatten, suchten wir nun nach Wegen, dieser entgegenzuwirken. Deshalb überlegten wir uns andere umweltfreundliche und nachhaltige Dämmmaterialien zu finden und in diesem Bereich weitere Forschungen anzustellen. Dafür geeignet erschienen uns Naturmaterialien, die in großer Menge vorhanden sind und einen nachwachsenden Rohstoff darstellen. Deshalb eigneten wir uns weiteres Fachwissen zur Wärmedämmung an und entwickelten einen Versuchsaufbau um die Dämmfähigkeit der verschiedenen Materialen zu vergleichen.

4. Theoretische Grundlagen zum Dämmverhalten von Stoffen

Der U-Wert

Um zu wissen, wie gut Materialien dämmen, wurde der sogenannte U-Wert, auch Wärmedurchgangskoeffizient genannt, als Ergänzung zum schon bestehenden λ-Wert eingeführt. Er findet vor allem Verwendung in der Bauindustrie, um den Wärmefluss durch Bauteile zu bestimmen. Der U-Wert gibt an, welche Energiemenge pro Zeiteinheit durch die Fläche von einem Quadratmeter fließt, so fern $\Delta\vartheta \neq 0$ gilt. Die SI-Einheit des U-Werts ist $\frac{W}{m^2 \times K}$. Er lässt sich durch die Formel $U = \frac{P}{A \times \Delta\vartheta}$ [4] berechnen, wobei:

U = Wärmedurchgangskoeffizient in $\frac{W}{m^2 \times K}$
P = Leistung in Watt
A = Fläche in Quadratmeter
$\Delta\vartheta$ = Temperaturunterschied zwischen den beiden Seiten des Dämmmaterials

Je kleiner der U-Wert eines Materials, desto besser dämmt dieses.

Der λ-Wert

Im Gegensatz dazu lässt sich mit dem λ-Wert, oftmals auch Wärmeleitzahl genannt, lediglich die Wärmeleitfähigkeit eines ein- oder mehrlagigen Materials angeben, wobei die Dicke des Materials nicht wie beim U-Wert variabel ist. Seine SI-Einheit ist $\frac{W}{m \times K}$ und man kann ihn entweder mit dem Fourierschen Gesetz direkt aus dem Temperaturunterschied $\Delta\vartheta$ oder mithilfe der Formel $\lambda = U \times d$ [4] aus dem U-Wert berechnen, wobei:

λ = Wärmeleitfähigkeit in $\frac{W}{m \times K}$
U = Wärmedurchgangskoeffizient $\frac{W}{m^2 \times K}$
d = Dicke des Dämmmaterials in Meter

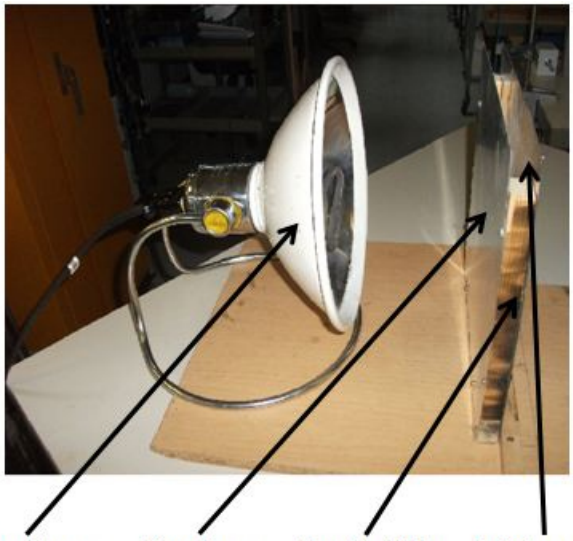
Auch beim λ-Wert gilt:
Je kleiner der λ-Wert eines Materials, desto besser dämmt es.

Bei der Berechnung von Wärmeströmen wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass Energie nur in Richtung geringerer Temperatur fließt. Dieser Sachverhalt wird im 2. Hauptsatz der Thermodynamik beschrieben.

5. Praktische Versuche

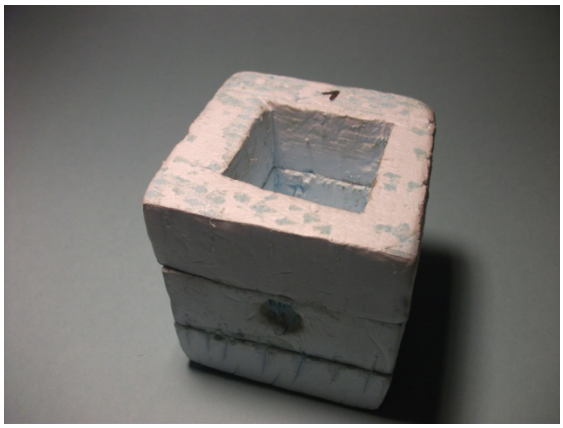
5.1 Ziele und Versuchsaufbau

Ziel der Versuchsaufbauten war es, die Wärmeleitfähigkeit von verschiedenen, vor allem von nachhaltigen Dämmmaterialien zu messen, um anschließend mit Hilfe von Formeln den U- bzw. λ-Wert des Testmaterials berechnen und mit herkömmlichen Werten von konventionellen Dämmmaterialen vergleichen zu können.



Unser erster Versuchsaufbau bestand darin, die Dämmmaterialien in einer Aluminiumkonstruktion (siehe Bild rechts) auf einer Seite mit einer Infrarotlampe zu bestrahlen, wodurch sich diese Seite schneller erwärmte als die von der Lampe abgewandte Seite des Dämmmaterials. Wir hofften nun mithilfe von Laserthermometern die Temperatur- differenz zwischen den beiden Seiten bestimmen und somit unter Anwendung des Fourierschen Gesetzes die Wärmeleitfähigkeit berechnen zu können. Dieser Versuch scheiterte aber, da das Aluminium den Laserstrahl reflektierte, was zu gravierenden Messungenauigkeiten führte. Da uns zu diesem Versuch kein passendes Thermometer zur Verfügung stand, überlegten wir uns ein anderes Modell, um die Wärmeleitfähigkeit zu erforschen.

Schließlich konstruierten wir einen weiteren Versuchsaufbau, bei dem wir einen Aluminiumwürfel mit der Seitenlänge 8 cm mit heißem Wasser erwärmten. Diesen gaben wir anschließend in ein selbst gebautes Modell aus 2cm starkem Styrodur, welches auf dem Bild rechts zu sehen ist, sodass dieser an allen Seiten, außer der oberen, mit Styrodur bedeckt ist. Auf die freie Seite legten wir das zu testende Material. Mit diesem Versuchsaufbau konnten wir die abgegebene Energie messen und somit die Wärmeleitfähigkeit berechnen. Aber bereits nach dem ersten Versuch stellten wir einen Nachteil jenes Versuchsaufbaus fest. Denn der Aluminiumwürfel verlor durch seine große Masse viel zu langsam an Temperatur, wodurch eine einzige Versuchsreihe mehrere Stunden gedauert hätte.

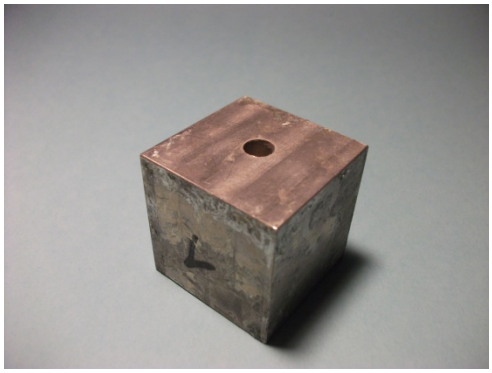


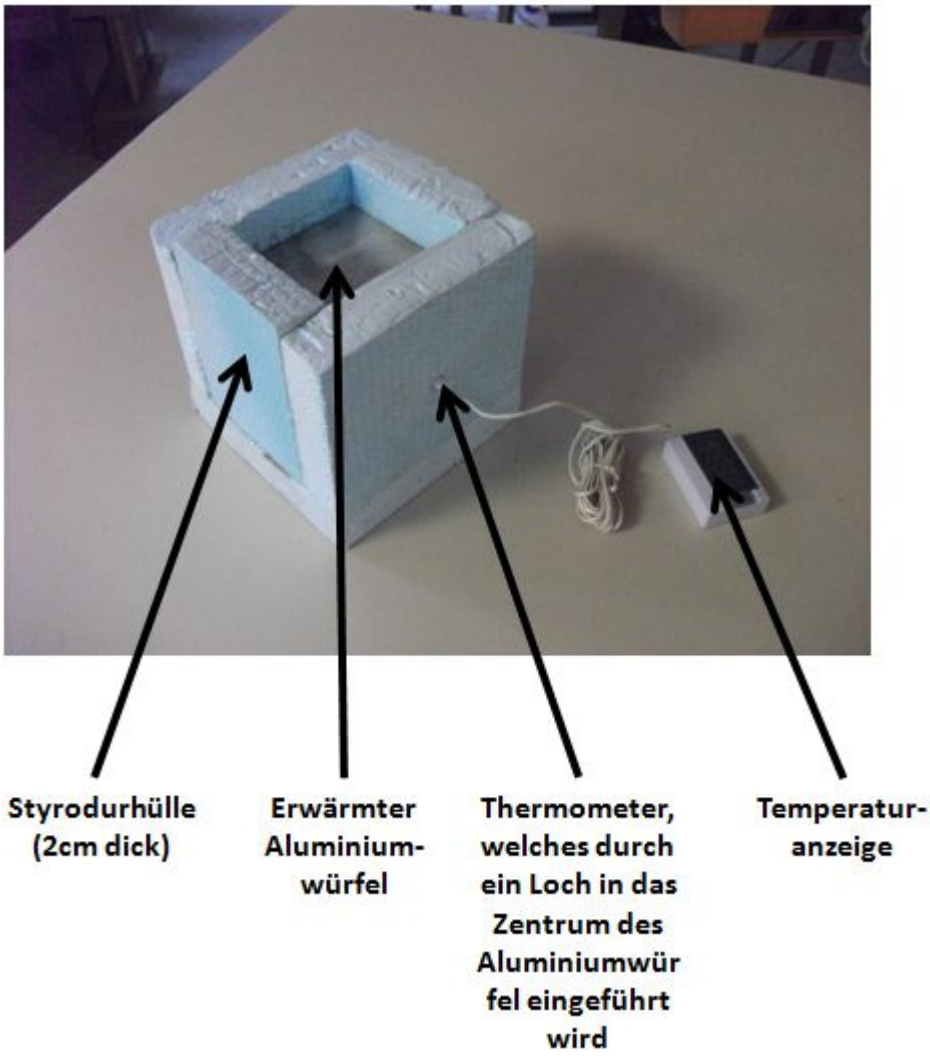
Dieses Problem lösten wir, indem wir neue Würfel mit der Seitenlänge 3,5 cm anfertigen ließen. Da diese eine wesentlich geringere Masse aufwiesen, konnten die Versuche nun beginnen.

Alle Aluminiumkörper wurden uns freundlicherweise von der Firma Heidenhain aus Traunreut angefertigt.

5.2 Allgemeine Vorgehensweise

Um mögliche Messungsungenauigkeiten vorzubeugen, verwendeten wir für jede Versuchsreihe immer drei identische Aluminiumwürfel (Bild rechts oben) mit drei identischen Styrodurhüllen. Mithilfe heißen Wassers erhitzten wir die Aluminiumwürfel auf 60°C bevor wir sie in die Styrodurhülle legten und mit dem Thermometer verbanden. Der Temperaturfühler wurde durch ein kleines Loch in der Styrodurhülle in den Aluminiumwürfel eingeführt, um die Temperatur in der Mitte des Aluminiumwürfels zu messen (Bild rechts unten). Eine Versuchsreihe dauerte 60 Minuten, alle zwei Minuten lasen wir die Temperaturen der drei Thermometer ab. Aus den drei parallel ermittelten Messwerten errechneten wir anschließend einen Durchschnittswert. Außerdem versuchten wir die Zimmertemperatur während der Messungen konstant auf 23,0 °C ± 0,5 K zu halten, wofür wir 2 weitere Thermometer verwendeten. Anschließend erstellten wir Tabellen und Diagramme um die gemessenen Werte anschaulich darzustellen und miteinander vergleichen zu können.





Berechnung des U- und λ-Werts aus unseren Messergebnissen

Bei der Auswertung der Ergebnisse war das Ziel immer die durch das Testmaterial abgegebene Energie zu berechnen, um daraus dann weiter den U- bzw. λ-Wert zu berechnen. Dabei waren die Vorgehensweise und die Formeln immer die gleichen. Zuerst mussten wir die insgesamt von dem Aluminiumwürfel innerhalb von 3600s abgegebene Energie berechnen, was mit der Formel $E_{AbG} = c \times m \times \Delta\vartheta$ [4] leicht möglich war, wobei:

E_{AbG} = insgesamt abgegebene Energie,

c = spezifische Wärmekapazität von Aluminium = $897 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \times \mathrm{K}}$ [5]

m = Masse des Aluminiumwürfels = 0,1162 kg

$\Delta\vartheta$ = Temperaturabnahme des Aluminiumwürfels

m und c sind in allen Versuchsreihen Konstanten, während $\Delta\vartheta$ von Versuch zu Versuch variiert ($\Delta\vartheta$ = 60°C – Temperatur nach 3600s).

Als nächstes mussten wir herausfinden wie viel dieser Energie durch das Styrodur bzw. das Testmaterial abgegeben wurde. Dazu recherchierten wir den U-Wert von 2cm starkem Styrodur (EPS-Hartschaum), dieser wurde in mehreren Quellen mit $1{,}7 \frac{\mathbf{W}}{\mathbf{m} \times \mathbf{K}}$ [6][7] angegeben. Nun konnten wir die Formel $U_{Styrodur} = \frac{\frac{\mathrm{EAbS}}{\Delta t}}{\mathrm{A} \times \Delta\vartheta}$ [4] nach E_{AbS} auflösen, wodurch sich die Formel

$E_{AbS} = U_S \times A_S \times \Delta\vartheta \times \Delta t$ ergab, in der uns nun alle Parameter bekannt waren, wobei

E_{AbS} = Durch das Styrodur abgegebene Energie

U_S = U-Wert von 2cm starkem Styrodur = $1{,}7 \frac{\mathbf{W}}{\mathbf{m}^2 \times \mathbf{K}}$ [6][7]

A_S = von dem Styrodur abgedämmte Fläche des Aluminiumwürfels = 0,006125 m²

$\Delta\vartheta$ = mittlerer Temperaturunterschied zwischen Aluminiumwürfel und Raumtemperatur

Δt = Zeitdifferenz zwischen den Messungen = 3600 s

In dieser Formel sind Δt, U_S und A_S bei allen Versuchsreihen Konstanten, währen $\Delta\vartheta$ sich wie in der oberen Gleichung verhält.

Die durch das Testmaterial abgegebene Energie lässt sich nun einfach mit $E_{AbT} = E_{AbG} - E_{AbS}$ berechnen, wobei

E_{AbT} = Durch das Testmaterial abgegebene Energie

E_{AbG} = insgesamt abgegebene Energie und

E_{AbS} = Durch das Styrodur abgegebene Energie

ist.

Aus den so gewonnenen Daten lässt sich weiter mit der Formel $U = \frac{\frac{EAbT}{\Delta t}}{A \times \Delta\vartheta}$ [4] der U-Wert des Testmaterials bestimmen, wobei

U = Wärmedurchgangskoeffizient des Testmaterials

E_{AbT} = Durch das Testmaterial abgegebene Energie

Δt = Zeitdifferenz zwischen den Messungen = 3600 s

A = Vom Testmaterial abgedeckte Fläche des Aluminiumwürfels = 0,001225 m²

$\Delta\vartheta$ = mittlerer Temperaturunterschied zwischen Aluminiumwürfel und Raumtemperatur

Nun war es uns möglich die verschiedenen Materialen sowohl untereinander als auch mit anderen zu vergleichen. Da in der Fachliteratur allerdings oftmals lediglich der λ-Wert als Maß für die Dämmfähigkeit eines Materials angegeben wird rechneten wir diesen zusätzlich aus dem zuvor bereits errechnetem U-Wert unter Anwendung der Formel $\lambda = U \times d$ [4] aus, wobei:

λ = Wärmeleitfähigkeitswert des Testmaterials und

d = Stärke des Testmaterials

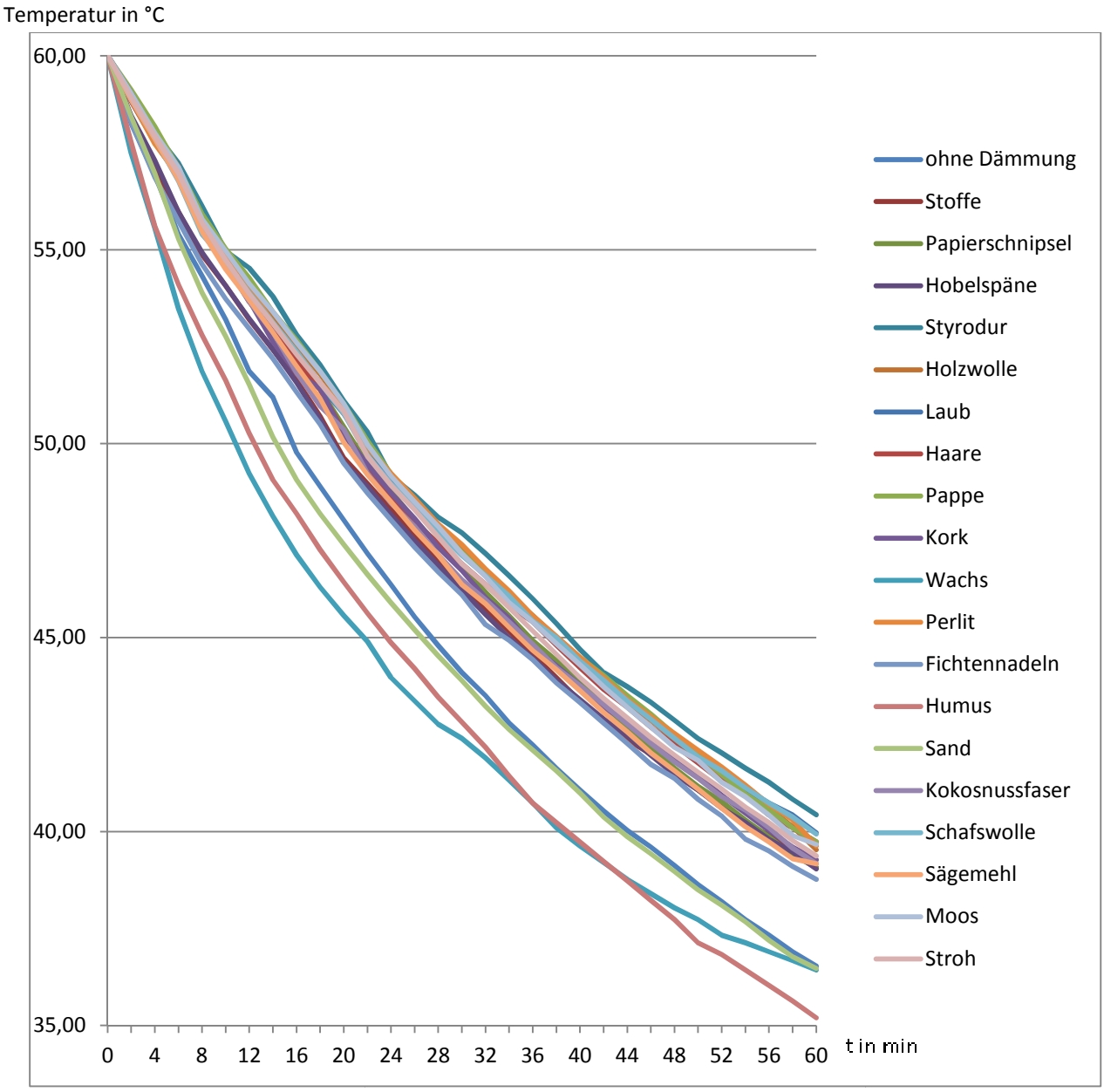
Bei der Versuchsreihe mit unterschiedlichen nachhaltigen Materialen betrug die Stärke d immer 2cm.

5.3 Versuche mit verschiedenen nachhaltigen Materialien

In der ersten Versuchsreihe wollten wir die Dämmfähigkeit nachhaltiger Materialen testen, um sie anschließend sowohl untereinander als auch mit herkömmlichen Dämmmaterialen vergleichen zu können. Die Stärke des Testmaterials betrug immer 2,0 cm. Im Anhang sind Bilder von allen getesteten Materialien zu finden.

5.3.1 Messergebnisse

Die einzelnen Messergebnisse können Sie im Anhang den Tabellen Tab. 1-20 entnehmen. Um die Ergebnisse besser darstellen zu können, erstellten wir zusätzlich ein Diagramm:



5.3.2 Auswertung der Messergebnisse

Um die Ergebnisse nun auswerten zu können, berechneten wir wie unter Kapitel 5.2 beschrieben sowohl den U- als auch den λ-Wert aller Materialien und fassten sie in der Tabelle rechts nach Dämmfähigkeit geordnet zusammen. Beim Vergleich der Werte stellte sich heraus, dass Laub der Beste von uns getestete nachhaltige Dämmstoff ist. Laub schneidet im direkten Vergleich zwar nicht ganz so gut ab wie Styrodur, aber es ist sogar besser als das aktuell in vielen Häusern als Dämmmaterial verwendete Perlit. Die zwei anderen Dämmstoffe, die ebenfalls besser abgeschnitten haben als Perlit, sind Schafswolle und Pappe. Zusätzlich zu dieser Erkenntnis fiel uns noch eine Gesetzmäßigkeit bezüglich der Platzierungen auf:

Material	errechneter U-Wert in $\frac{W}{m^2 \times K}$	errechneter λ-Wert in $\frac{W}{m \times K}$
Laub	**2,060**	**0,041**
Schafwolle	2,071	0,041
Pappe	2,089	0,042
Moos	2,227	0,042
Holzwolle	2,135	0,043
Haare	2,137	0,043
Stroh	2,208	0,044
Kork	2,258	0,045
Kokosnussfaser	2,286	0,046
Papierschnipsel	2,293	0,046
Sägemehl	2,305	0,046
Stoff	2,361	0,047
Hobelspäne	2,375	0,047
Fichtennadeln	2,459	0,049
Sand	3,292	0,066
Wachs	3,613	0,072
Humus	3,835	0,077
Perlit	2,114	0,042
Styrodur	1,917	0,038
ohne Dämmung	3,222	0,064

Materialien mit einer geringen Dichte dämmen in der Regel besser als Materialien mit einer höheren Dichte. Deutliche Beispiele für diese Feststellung sind Wachs, Humus und Sand. Alle drei Stoffe dämmen, wie in dem Diagramm auf der letzten Seite deutlich zu sehen, viel schlechter als alle anderen. Wir fanden heraus, dass dies an der in den Materialien eingeschlossenen Luft liegt. Wachs, Humus und Sand besitzen im Vergleich zu den anderen Materialien eine hohe Dichte, daher ist weniger Luft in ihnen eingeschlossen. Luft hat mit ca. 1,2041$\frac{kg}{m^3}$ [8] eine sehr geringe Dichte und gleichzeitig mit 0,0262 $\frac{W}{m^2 \times K}$ [9] eine relativ niedrige Wärmeleitzahl. Diese beiden Faktoren und die Tatsache, dass Luft nahezu unbegrenzt verfügbar ist, machen Luft eigentlich zu einem der besten Dämmmaterialien die es geben kann. Allerdings scheint die Messung ohne jede Dämmung (also mit Luft) mit einem errechneten λ-Wert von 0,064 $\frac{W}{m^2 \times K}$ das Gegenteil zu beweisen. Es liegt daran, dass sich bei unserem Versuchsaufbau die Luft, im Gegensatz zu allen anderen von uns getesteten Materialien, frei im Raum bewegen kann. Daher erwärmt die vom Aluminiumwürfel abgegebene Energie die Luft in der unmittelbaren Umgebung. Diese steigt auf oder wird von Luftzügen in eine andere Richtung weggetragen, wodurch wieder kältere Luft nachströmt, die wieder erwärmt wird. Dadurch wird viel mehr Energie an die Umgebung abgegeben, folglich kühlt der Aluminiumwürfel schneller ab. Dieses Phänomen nennt sich Wärmetransport durch Konvektion.

Als Ergebnis dieser Versuchsreihe lässt sich festhalten, dass Luft an sich ein sehr guter Dämmstoff ist, solange sie wie zum Beispiel in Laub oder Wolle gewissermaßen eingeschlossen, also nicht frei beweglich ist.

5.3.3 Vergleich mit recherchierten λ-Werten

Aufgrund diverser Faktoren wie zum Beispiel die nicht perfekten würfelförmigen Styrodurhüllen oder der um 1K schwankenden Raumtemperatur, kommt es zu Messungenauigkeiten bei den Versuchen. Um zu überprüfen, wie genau unsere Messungen beziehungsweise Berechnungen waren, verglichen wir unsere λ-Werte mit recherchierten Werten, welche wir aus verschiedenen Quellen ermittelten. Die Abweichungen, die Sie der Tabelle rechts entnehmen können, sind relativ gering. Daher können wir uns sicher sein, dass die übrigen Werte, welche sich nicht ermitteln ließen, auch relativ exakt sind. Deshalb lassen sie sich nicht nur untereinander, sondern auch realistisch mit anderen Werten wie zum Beispiel von konventionellen Dämmstoffen vergleichen.

Material	ermittelter λ-Wert in $\frac{W}{m \times K}$	recherchierter λ-Wert in $\frac{W}{m \times K}$	Abweichung in $\frac{W}{m \times K}$
Kork	0,045	0,035-0,046 [9]	**0**
Papier (Zellulose)	0,046	0,037-0,045 [9]	**0,001**
Stroh	0,044	0,038-0,067 [9]	**0**
Schafwolle	0,041	0,040 [10]	**0,001**
Sand	0,066	0,070 [10]	**0,004**
Perlit	0,042	0,042 [11]	**0**
Hobelspäne	0,047	0,05 [11]	**0,003**
Kokosnussfaser	0,046	0,045 [12]	**0,001**
Styrodur (EPS)	0,038	0,035-0,04 [13]	**0**

5.3.4 Vergleich mit weiteren herkömmlichen Baustoffen

Nachdem wir festgestellt hatten, dass die von uns getesteten nachhaltigen Dämmmaterialien durchaus mit heute modernem Perlit konkurrieren können, verglichen wir unsere mit weiteren modernen Dämmmaterialien aus dem Baugewerbe. Hierzu recherchierten wir wiederum die entsprechenden λ-Werte, welche Sie der Tabelle rechts entnehmen können. Dabei fällt auf, wie zuvor von uns schon festgestellt und erklärt, dass Materialien mit einer hohen Dichte, wie zum Beispiel Stahl, Beton, Glas und Zementestrich viel schlechter abschneiden als die übrigen Materialien. Wenn man nun aber die Werte dieser Tabelle mit den von uns errechneten Werten für nachhaltige Dämmmaterialien vergleicht, sieht man: Die meisten der von uns getesteten Materialien können mit fast allen heutzutage modernen Materialien, wie Expandiertes Polystyrol (Styropor), Styrodur, Mineralwolle oder Perlit mithalten. Aerogel und Vakuumdämmplatten schneiden mit deutlichem Abstand am besten ab.

Material	recherchierter λ-Wert in $\frac{W}{m \times K}$
Stahl	48-58 [9]
Beton	2,1 [9]
Glas	0,76 [9]
Perlit	0,42 [11]
Zementestrich	1,4 [11]
Mineralwolle	0,032-0,05 [9]
Steinwolle	0,04 [11]
Styrodur (EPS)	0,035-0,04 [13]
Polyurethan (PUR)	0,021-0,035 [9]
Polyvinylchlorid (PVC)	0,17 [9]
Expandiertes Polystyrol	0,04 [11]
Aerogel	0,013-0,02 [9]
Vakuumdämmplatte	0,004-0,006 [9]

5.4 Versuche mit unterschiedlichem Wasseranteil

Bei dieser Versuchsreihe wollten wir testen, wie sich die Feuchtigkeit, die die Dämmmaterialen aufnehmen, auf die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung auswirkt. Als Testmaterial verwendeten wir Sägemehl, da dieses Feuchtigkeit, also Wasser gut aufsaugen kann, wodurch wir uns exaktere Messwerte erhofften. Zwar besitzt Holz (und daher auch Sägemehl) immer einen gewissen Wasseranteil, da uns aber keine technischen Möglichkeiten zur Verfügung standen, diesen Wert zu bestimmen, nahmen wir an, das Sägemehl wäre ohne jegliche Feuchtigkeit. Daher beziehen sich die Prozentangaben lediglich auf den Masseanteil an Wasser, den wir immer kurz vor den Messungen mit dem Sägemehl vermengten. Die Prozentangaben scheinen zwar sehr hoch zu sein, sind in Wirklichkeit aber relativ gering, da sie sich ja auf den

Masse an Wasser in g	Masse an Sägemehl in g	Wasser (Massen-anteil)	Wasser (Volumen-anteil)
0	20	**0%**	**0%**
10	20	**33%**	**4,46%**
20	20	**50%**	**9,09%**
30	20	**60%**	**13,0%**
40	20	**66%**	**16,6%**

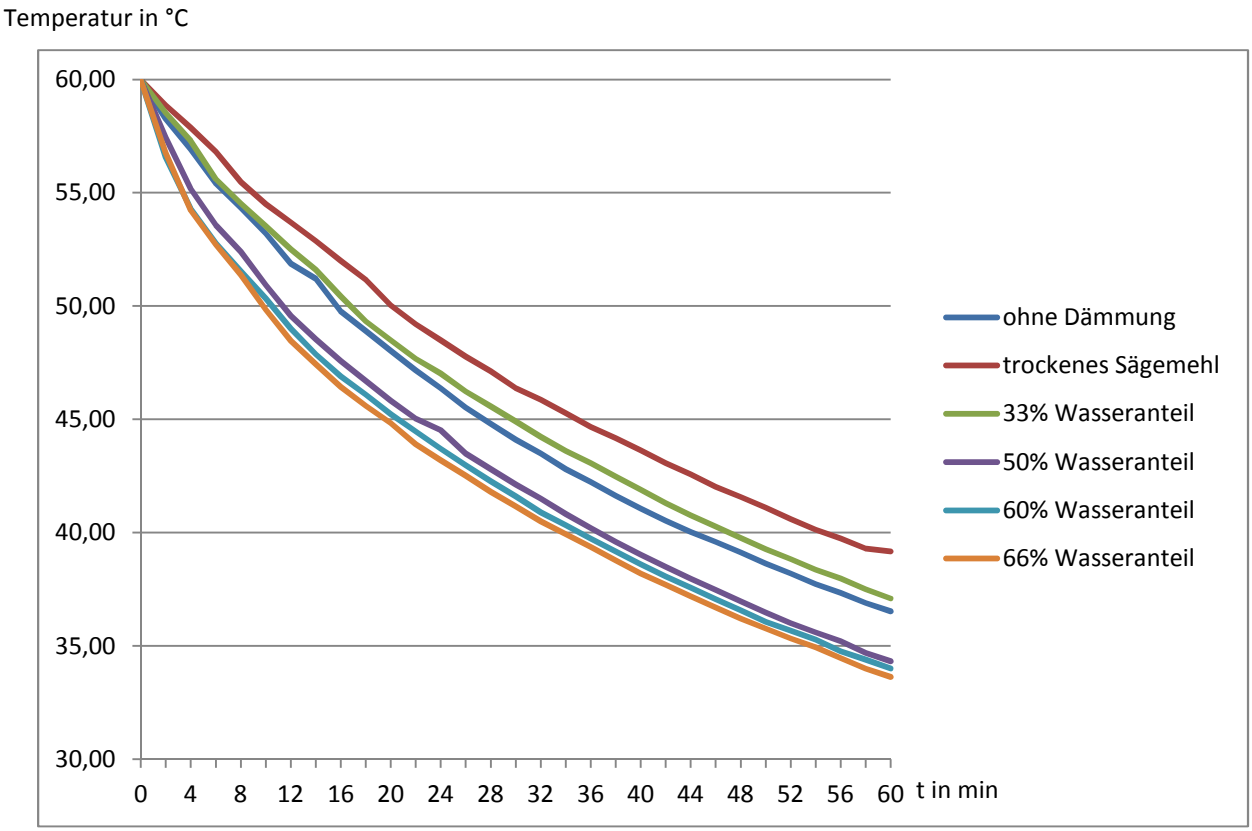
Masseanteil beziehen und Sägemehl im Verhältnis zu Wasser eine sehr geringe Dichte hat. Durch Verdunstung während der Messungen ist der Anteil an Wasser nicht immer gleich, wodurch es zu Messungenauigkeiten kommen kann.

Für unsere Versuche maßen wir immer 20g Sägemehl ab und fügten das Wasser erst kurz vor Beginn der Messreihe hinzu um die Verdunstung zu minimieren. Wir führten insgesamt 4 Messungen durch. Aus der rechten Tabelle können Sie den Zusammenhang zwischen der Masse an zugeführtem Wasser, Anteil an der Wassermasse in Prozent und Anteil an dem Wasservolumen in Prozent ablesen. Die weitere Vorgehensweise bei dieser Versuchsreihe deckt sich mit der aus Kapitel 5.3. Die einzelnen Messergebnisse können sie der Tabelle Tab. 1-24 im Anhang entnehmen.

Auswertung der Messergebnisse

Die Ergebnisse dieser Messreihe (siehe Tabelle rechts unten und Diagramm auf der nächsten Seite) verwunderten uns anfänglich sehr, da auffällt, dass ab der Messung mit 50% Wassermassenanteil die Messwerte schlechter sind, als wenn man überhaupt keine Dämmung verwendet. Dieses Phänomen war uns auch schon bei der vorherigen Messreihe (Kapitel 5.3) bei Humus aufgefallen. Nun war zumindest klar, warum Humus so schlecht abgeschnitten hatte: Der Humus war nicht vollständig von uns getrocknet worden, wodurch er noch relativ viel Wasser enthielt, als wir ihn testeten. Zusätzlich fällt bei dem Betrachten des Diagramms (siehe nächste Seite) auf, dass die Messwerte mit zunehmendem Wasseranteil immer schlechter werden. Folglich recherchierten wir den U-Wert von Wasser. Erwartet hätten wir einen U-Wert, der auf jeden Fall schlechter als 4,644 $\frac{W}{m^2 \times K}$ ist, also dem Wert mit dem größten Wasseranteil. Allerdings mussten wir feststellen, dass unsere Recherche lediglich einen Wert von 0,5562 $\frac{W}{m^2 \times K}$ [9] ergab, es musste also eine andere Lösung geben, warum die Wärmedämmung von feuchten Materialien so extrem schlecht ist.

Wassermassen-anteil	errechneter U-Wert in $\frac{W}{m^2 \times K}$	Errechneter λ-Wert in $\frac{W}{m \times K}$
0%	2,305	0,046
33%	2,982	0,060
50%	4,205	0,084
60%	4,437	0,089
66%	4,644	0,093
ohne Dämmung	3,222	0,064



Spezifische Wärmekapazität als nennenswerter Faktor

Die Lösung dieses Problems ist ähnlich zu dem mit Luft als Dämmung in Kapitel 5.3.2. Das in den Sägespänen enthaltene Wasser wird durch die Energie, die der Aluminiumwürfel abgibt erwärmt, bis es nach und nach verdunstest. Da Wasser eine sehr hohe spezifische Wärmekapazität besitzt (4184 $\frac{J}{kg \times K}$ [14]), wird dem Aluminiumwürfel sozusagen mehr Energie zur Erwärmung des Wassers entzogen, als eigentlich durch Wärmeleitung abgegeben werden würde. Natürlich gilt dies auch für alle anderen von uns getesteten Materialien, allerdings besitzen diese zum einen eine wesentlich geringere spezifische Wärmekapazität, zum anderen müssen fester Materialien nur einmal erwärmt werden, da sie nicht entweichen (verdunsten) können. Bei Wasser (und allen anderen Flüssigkeiten und Gasen) ist das anders, denn sie verdunsten bzw. erwärmen sich oder steigen nach oben, wodurch nun neue Flüssigkeit bzw. Gas in die Nähe des Aluminiumwürfels kommt und wieder erhitzt wird.

Bedeutung für Dämmmaterialien im Allgemeinen

Diese Tatsache sollte durchaus eine Rolle bei der Wahl des Dämmmaterials spielen, denn derzeit wird darauf noch überhaupt nicht geachtet. Zwar hat die spezifische Wärmekapazität keine Auswirkung auf die Wärmedämmung, wenn man von einer konstanten Temperatur des zu dämmenden Raumes ausgeht, jedoch spielt sie eine Rolle, wenn sich die Temperatur des zu dämmenden Raumes erhöht.

Bedeutung für die von uns getesteten nachhaltigen Dämmmaterialien

Für die von uns getesteten nachhaltigen Materialien hat vor allem die Tatsache, dass ein größerer Wasseranteil die Dämmung verschlechtert, negative Folgen, da fast alle der getesteten Materialien Wasser aufnehmen. Genau aus diesem Grund und des Weiteren, weil fast alle Materialien unbearbeitet einen guten Lebensraum für Insekten und andere Kleintiere bilden, versuchten wir, eine Lösung für diese Probleme zu finden.

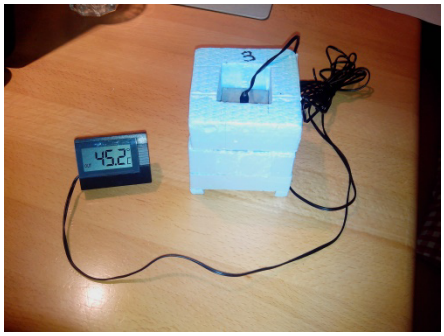
6. Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse und neue Zielsetzung

Unsere bisherige Arbeit zeigte, dass umweltfreundliche und nachhaltige Dämmstoffe in Bezug auf ihre Dämmfähigkeit mit herkömmlichen konkurrieren können. Aus unseren Versuchen geht hervor, dass Laub das Beste der getesteten Dämmmaterialien ist. Unsere neue Zielsetzung bestand nun aus zwei Teilen: Der erste Teil bestand darin die Dämmeigenschaften von Laub weiter zu verbessern und die Nachteile von Laub als Dämmstoff zu eliminieren. Zu den Nachteilen gehören die schlechte Feuchtigkeitsresistenz und die damit verbundene Anfälligkeit für Schimmel, Pilze und Insekten, zudem die leichte Brennbarkeit von Laub, und die daraus resultierenden Risiken im Brandfall und die schlechte Witterungsbeständigkeit von Laub. Der zweite Teil unserer Arbeit besteht darin ein theoretisches Modell zur flächendeckenden Nutzung von Laub als Dämmstoff zu entwerfen, zu überprüfen und mögliche Probleme aufzudecken und abzuschätzen. Dieser Teil besteht fast ausschließlich aus theoretischen Überlegungen, da uns kein einziges Projekt mit einem ähnlichen Ansatz bekannt ist, sodass es keine Erfahrungen mit der Aufbereitung bzw. Weiterverarbeitung von Laub im Allgemeinen gibt.

7. Optimierung der Dämmeigenschaften und Lösungen für die Nachteile von Laub als Dämmstoff

7.1 Optimierung der Dämmeigenschaften

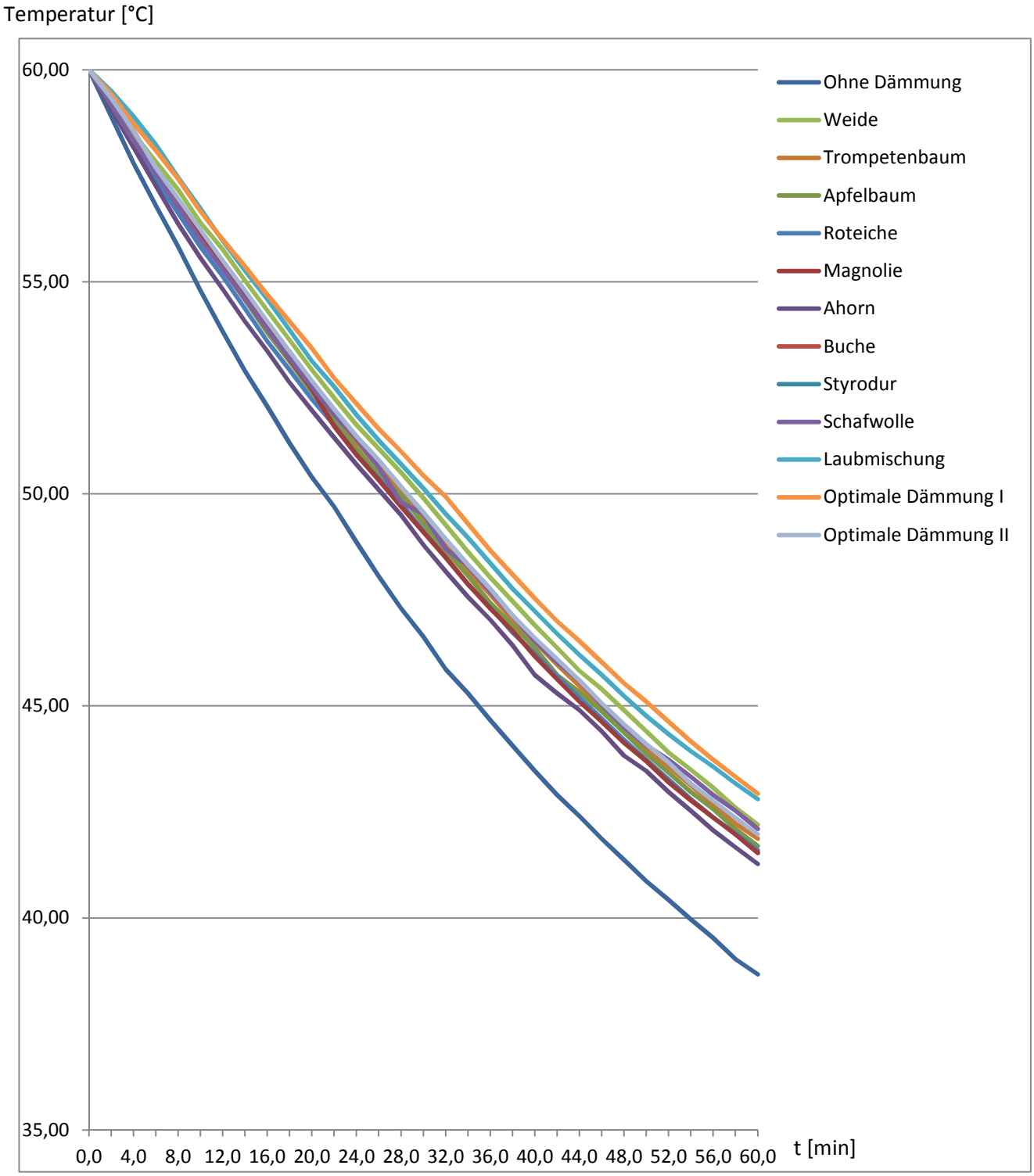
Da wir vermuteten, dass aufgrund der verschiedenen Blattstrukturen die Blätter auch unterschiedlich gute Dämmeigenschaften haben, wollten wir das Laub verschiedener Bäume untersuchen. Des Weiteren erhofften wir uns durch Kombination diverser Laubarten wegen unterschiedlicher Eigenschaften der Blätter noch bessere Dämmeigenschaften.



Wir veränderten unseren Versuchsaufbau nur geringfügig, indem wir das Thermometer von montierten. Der Ablauf einer Messung blieb gleich.

7.1.1 Ergebnisse

Die gemessene Temperaturabnahme stellt das folgende Diagramm dar, die fertig ausgewerteten Dämmwerte werden auf Seite 21 in einer Tabelle zusammengefasst und ausreichend erläutert. Zudem finden sich im Anhang noch alle einzelnen Messdaten zu allen Versuchen (Tab.25-34) und Lichtbilder der verschiedenen Laubarten.



7.1.2 Auswertung der Messergebnisse

Um die Ergebnisse nun auswerten zu können, berechneten wir, wie unter Kapitel 5.2 beschrieben, sowohl den U- als auch den λ-Wert aller getesteten Laubarten und fassten sie in der Tabelle rechts nach Dämmfähigkeit geordnet zusammen. Weide schnitt im direkten Vergleich am besten ab, gefolgt vom Laub des Trompetenbaums. Anschließend testeten wir, ob sich die Dämmfähigkeit durch mischen der beiden Laubarten noch zusätzlich, bedingt durch die Änderung der Struktur, verbessert. Diese Mischung ist in der Tabelle und dem Diagramm unter „Laubmischung" aufgeführt und zeigt, dass es tatsächlich möglich ist durch Kombination der einzelnen Blattstrukturen einen noch besseren Dämmwert zu erreichen. Der so erreichte λ-Wert von 0,031 $\frac{W}{m \times K}$ stellte uns absolut zufrieden, da er deutlich besser ist als der von herkömmlichen Styrodur.

Material	errechneter U-Wert in $\frac{W}{m^2 \times K}$	errechneter λ-Wert in $\frac{W}{m \times K}$	Dichte in $\frac{g}{dm^3}$
Laubmischung	**1,528**	**0,031**	**55**
Weide	1,669	0,033	85
Trompetenbaum	1,774	0,035	25
Apfelbaum	1,816	0,036	70
Roteiche	1,852	0,037	45
Magnolie	1,857	0,037	40
Ahorn	1,947	0,039	55
Buche	1,952	0,039	25
Schafwolle	1,726	0,035	
Styrodur	1,723	0,034	
ohne Dämmung	2,712	0,054	

Um zu überprüfen, ob auch bei den verschiedenen Laubarten eine geringe Dichte für eine gute Wärmedämmung von Vorteil ist (s. Kapitel 4), bestimmten wir ihre Dichte. Dabei fiel auf, dass Weide, unser bestes Laub, die größte Dichte hat. Wir folgerten daraus, dass für eine gute Wärmedämmung nicht nur die geringe Dichte sondern tatsächlich auch die Blattstruktur entscheidend ist. Deswegen untersuchten wir mit einem Mikroskop an unserer Schule die Blattoberflächenstruktur. Dabei beobachteten wir folgendes:

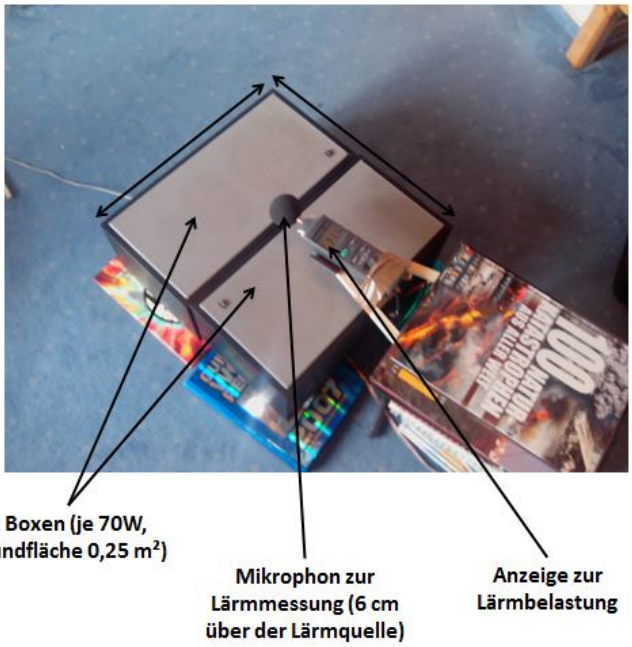
Wenn die Blätter eine raue Oberfläche besitzen, so bilden sich bei deren Schichtung in der Dämmung Hohlräume. Dabei wir Luft eingeschlossen, was besonders wichtig für die Dämmeigenschaft ist. Weide hat zwar die höchste Dichte, rollt sich aber während des Trocknens ein, sodass winzig kleine Rohre entstehen. Das führt zu einem sehr hohen Lufteinschluss, begründet aber auch eine höhere Dichte. Auch der Trompetenbaum schließt sehr viel Luft aufgrund dessen Schwammgewebes, das sehr ausgeprägt ist, ein. Zudem hat er eine sehr geringe Dichte. Auf ihn folgt der Apfelbaum, der durch seine starke Behaarung eine sehr raue Oberfläche hat, die wiederum Lufteinschlüsse bei der Überlagerung der Blattteile in der Dämmung begünstigt. Die nicht so gute Dämmfähigkeit von Roteiche und Magnolie lässt sich durch die glatte Oberfläche erklären. Ahorn hat zusätzlich zur glatten Oberfläche noch eine sehr hohe Dichte, weswegen er sich nicht so gut für die Wärmedämmung eignet. Das schlechteste Ergebnis erzielte Buche, was an der dünnen, luftdurchlässigen Blattstruktur und an der eher glatten Oberfläche liegt. Jedoch ist anzumerken, dass die Unterschiede zwischen einzelnen Laubarten relativ klein sind.

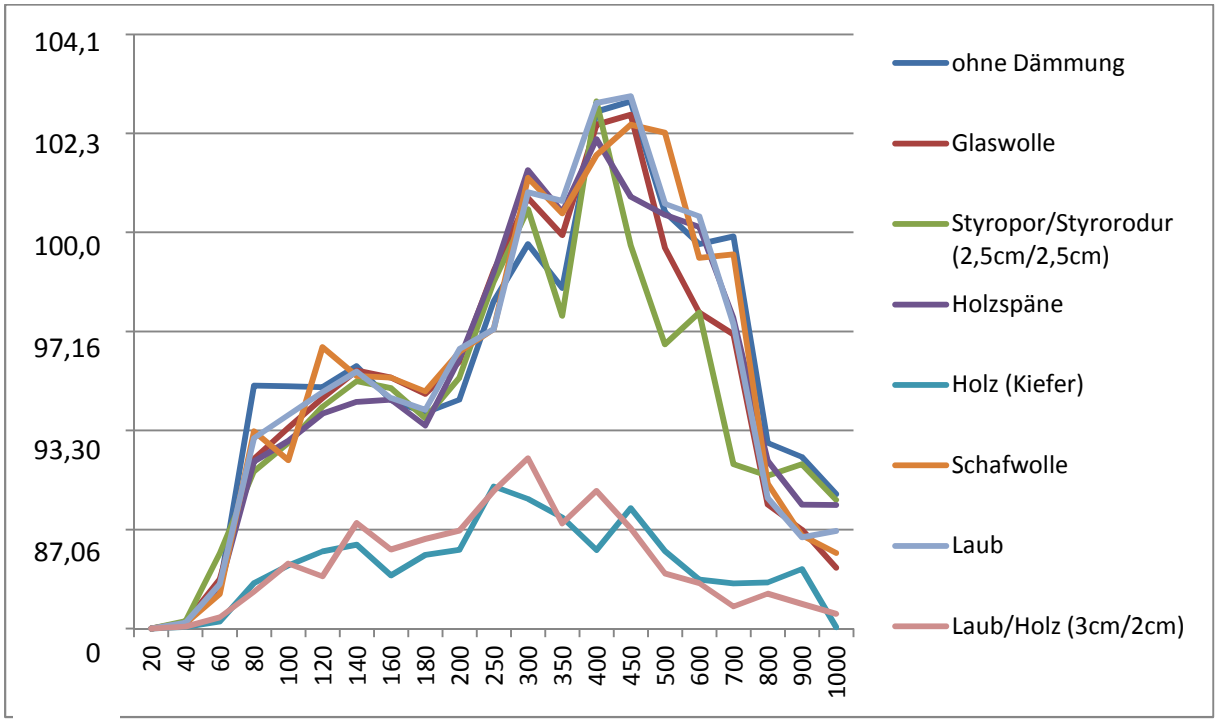
In dem Diagramm auf Seite 20 sind auch zwei optimale Dämmungen zu finden. Sie werden im Kapitel 8 genauer erläutert.

7.2 Aspekt der Schalldämmung

In der heutigen Zeit werden an Dämmstoffe vielfältige Anforderungen gestellt. Es reicht nicht mehr aus, dass ein Dämmstoff nur gut Wärme isoliert, sondern er muss auch anderen Herausforderungen gewachsen sein. Beispielsweise sollte er im optimalen Fall brand- und feuchtigkeitsresistent und eben auch schalldämmend sein. Besonders in der Nähe zu Verkehrsadern, Flughäfen und in Großstädten nimmt die Lärmbelastung stetig zu, weshalb deren wirksame Bekämpfung immer wichtiger wird. Auch wir wollten nun Laub auf seine Eigenschaft zur Schalldämmung testen. Wir überlegten uns also einen folgenden Versuchsaufbau:

Wir legten zwei herkömmliche Boxen mit je 70Watt Leistung auf den Boden, dadurch ergab sich eine Grundfläche von 0,25 m², auf der beschallt wurde. Auf diese Fläche legten wir dann eine 5,0 cm starke Schicht des Testmaterials und gingen dann mithilfe eines Signaltons alle Frequenzen von 20 Hz bis 1000 Hz durch (siehe Bild rechts). Bei Frequenzen bis 200Hz notierten wir alle 20 Hz die entsprechende Lautstärke, von 200Hz, bis 500Hz in 50Hz-Schritten und von 500Hz bis 1000 Hz in Abständen von 100 Hz. Die betreffende Lautstärke lasen wir von einem Schallpegelmessgerät (KLIMATHERM BTFS-1) ab. Daraus ergab sich folgendes Diagramm (einzelne Messergebnisse im Anhang unter Tab.35-42):





Die logarithmische Skalierung des Diagramms resultiert daraus, dass die Einheit dB im Verhältnis zur vom Menschen gehörten Lautstärke eine logarithmische Einheit ist. So sind zwischen 90 dB und 100 dB nur 10 dB Differenz, allerdings werden 100 dB vom menschlichen Gehör als doppelt so laut empfunden [15]. Da für unsere Forschung lediglich die vom menschlichen Gehör empfundene Lautstärke interessant ist, rechneten wir unsere Daten um und skalierten unser Diagramm dementsprechend. Im Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass bestimmte Frequenzen einen stärkeren Impuls verursachen als andere. Es ist auch zu erkennen, dass manche Stoffe in bestimmten Frequenzbereichen anscheinend schlechter dämmen als die Testreihe ohne jede Dämmung. Diese beiden Erscheinungen hängen mit der sogenannten Eigenfrequenz eines Stoffes zusammen. Jeder Stoff hat eine bestimmte Eigenfrequenz, wenn der Stoff nun genau mit dieser Frequenz durch die Schallwellen bewegt wird fängt der Stoff bedingt durch die Molekülbewegung an sich immer stärker zu bewegen und erzeugt somit noch mehr Schall. Andere Stoffe absorbieren bestimmte Frequenzen recht gut, sie sind also als Schalldämmung für genau diesen Frequenzbereich sehr gut geeignet.

Ein Aspekt, der allerdings sofort ins Auge fällt, ist die unschlagbare Schalldämmung von Holz. Aufgrund seiner hohen Dichte und dank anderen Eigenschaften ist Holz ideal zur Schalldämmung geeignet. Laub schneidet bei diesem Versuch weder besonders gut noch besonders schlecht ab, sondern liegt in etwa bei den restlichen Dämmstoffen. Da uns nun langsam der Gedanke kam, man könnte das Laub möglicherweise als Dämmung zwischen der Hausmauer und einer zusätzlichen angebrachten Holzverkleidung platzieren, testeten wir zusätzlich eine Kombination aus Laub und 2cm starkem Holz, also der Standardstärke für Holzbretter, welche zur Fassadenverkleidung häufig genutzt werden. Interessanterweise verschlechterte die Reduzierung der Holzstärke von 5 cm um 60% auf 2 cm die Schalldämmung nur minimal.

7.3 Lösung der Nachteile von Laub als Dämmstoff

Wie schon zuvor angesprochen, fanden wir bei Laub einige Nachteile bezüglich der Feuchtigkeitsresistenz, des Brandschutzes, möglicher Gesundheitsrisiken und der Witterungsbeständigkeit. In diesem Kapitel versuchen wir nun, meist mit theoretischen Ansätzen und darauffolgenden Versuchen diese Nachteile auf ein Minimum zu reduzieren.

7.3.1 Schlechte Feuchtigkeitsresistenz als grundsätzliche Ursache

Die grundsätzliche Ursache für die Nachteile von Laub bildet die schlechte Feuchtigkeitsresistenz. Aus diesem grundsätzlichen Problem resultieren dann erst Probleme wie schlechte Witterungsbeständigkeit und mögliche Gesundheitsrisiken durch Bakterien, Insekten, Schimmel und Pilze. Wenn es uns also nun gelingt das Laub resistent gegen Feuchtigkeit zu machen, würde dies dazu führen, dass das Laub nun nur noch minimal anfällig für Pilze und Schimmel wäre. Also überlegten wir uns wie wir das Laub gegen eindringende Feuchtigkeit schützen könnten.

Wir suchten also nach Lösungen für unser Problem und stießen nach längeren Recherchen auf die Möglichkeit die zuvor schon von uns erforschte Schafwolle als Schutzschicht vor dem Laub anzubringen.

7.3.2 Schafwolle als Lösung

Schafwolle wird schon seit langer Zeit als nachhaltiger Dämmstoff, meist für Innendämmung und Dachdämmung, genutzt. Auf dem Markt wird die Schafwolle als Meterware nadelverfilzt in verschiedenen Breiten, Längen und Stärken angeboten. Sie wird zuvor industriell gewaschen und gereinigt, das heißt es werden Wollschweiß, Wollfett, Hautschuppen sowie Erd- und Pflanzenreste entfernt. Die Wolle zeichnet sich durch ihre hohe Elastizität, ihrer natürlichen Kräuselung, durch die sehr viel Luft eingeschlossen wird und durch ihr feuchtdynamisches Verhalten aus. Der Dämmstoff kann bis zu 30% seines Eigengewichts an Feuchtigkeit aufnehmen, ohne dass sich dessen Wärmeleitfähigkeit verändert, und diese Feuchtigkeit bei geringer Luftfeuchtigkeit wieder abgeben. Dies liegt daran, dass die Feuchtigkeit in Dampfform in den Fasern gespeichert wird, jedoch kondensiertes Wasser wegen der hydrophoben Oberfläche abperlt. Zudem entzündet sich die Schafswolle erst bei Temperaturen zwischen 500 bis 600°C, wobei sich nur Asche bildet und somit selbstverlöschend ist, man benötigt also kein zusätzliches Brandschutzmittel. Außerdem ist die Schafwolle gesundheitsfördernd, da sie Schadstoffe wie Formaldehyd aus der Luft bindet. Eine Problematik besteht in den Wollschutzmitteln, wie den heutzutage häufig genutzten Borate, da diese oft als gesundheitsgefährdend und toxisch eingestuft werden. Sie sollen dem Befall von Schädlingen vorbeugen, bei Schafwolle insbesondere dem von Motten und Teppichkäfer.

Es gibt aber auf dem Markt eine chemische Alternative: Das Produkt Thorlan IW, welches mit dem anorganischen Salz Kaliumfluorotitanat IV wirkt, hat keine bekannten Auswirkungen auf den menschlichen Körper. Wenn das Salz in den Nahrungskreislauf der Schädlinge gelangt, werden diese abgetötet, wodurch die Wolle von einem größeren Befall durch Insekten geschützt ist. Wenn die Dämmung zusätzlich luftdicht verpackt ist, dürfte es keinerlei Probleme mit Schädlingsbefall geben. Thorlan hat keinen Einfluss auf die Struktur der Wolle und hält sich, da es ein Salz ist mehr oder weniger ewig. Zudem werden laut Hersteller nur „minimale Mengen“ des Salzes für eine wirksame Schädlingsbekämpfung benötigt [16].

Bei unseren Recherchen sind wir zudem auf eine biologische Alternative gestoßen, welche derzeit bereits für Wollteppiche eingesetzt wird. Es ist das Öl des Niembaumes, der in trockenen Gebieten vor allem aber in Indien wächst. Das aus dessen Samen gepresste Öl ist allgemein bekannt unter dem Namen Neemöl und wird schon seit längerer Zeit als Schutz gegen Insekten eingesetzt. Außerdem ist es völlig unbedenklich für die Gesundheit des Menschen. In Anbetracht der Tatsache, dass auch Laub gegen Schädlinge resistent gegen Schädlingsbefall gemacht werden muss, wollten wir das Öl genauer untersuchen. Das große Problem dabei ist aber, dass es auf dem Markt kaum unbehandeltes Neemöl zu kaufen gibt und dieses mit ca. 20-40 €/l [17] relativ teuer ist. Der Wirkstoff des Neemöls, Azardirachtin, greift in die Chitinsynthese ein. Somit wird der Aufbau des Außenskeletts der Insekten gestört und Larven können sich so nicht entwickeln und verpuppen.

Bei unseren eigenen Versuchen haben wir Rohwolle bei 30°C Handwäsche gereinigt, wobei noch vereinzelt Pflanzenreste, die sich in der Wolle verfilzt haben, hängen geblieben sind. Diese haben aber so gut wie keine Einwirkung auf die Wärmeleitfähigkeit der Schafwolle, da deren Anteile sehr gering sind. Nachdem die Wolle getrocknet war, haben wir diese verfilzt. Jedoch haben wir die Wolle nassverfilzt, da ein Verfilzen mit der Nadel aufgrund des hohen

Zeitaufwands nur maschinell möglich ist. Wir erhofften uns durch das Verfilzen der Schurwolle besonders gute Messungen, da dadurch viel Luft eingeschlossen wird. Unsere Vermutung hatte sich dann auch bestätigt.

Wir haben uns die Frage gestellt, warum sich Motten und Insekten in der Wolle einnisten, wenn man sie als Dämmung nutzt, nicht aber bei Schafen. Es könnte an der Körperwärme und den Ausdünstungen der Tiere liegen. Deswegen wollten wir in einer Versuchsreihe Motten auf ungewaschene Schurwolle geben, um dies zu testen. Leider haben wir keine Möglichkeit gefunden Insekten zu besorgen, da Motten und Teppichkäfer Schädlinge sind, weshalb sie in Zoofachgeschäften nicht angeboten werden.

Des Weiteren testeten wir die tatsächliche Brennbarkeit von Schafwolle. Für diesen Versuch entzündeten wir einen kleinen Teil unserer verfilzten Wolle mit einem Feuerzeug. Die Wolle fing nicht zu brennen an, tatsächlich verschmorte sie lediglich unter Bildung von Asche (siehe Bild rechts).

Abschließend kann man sagen, dass sich Schafwolle wegen ihrer sehr guten Dämmfähigkeit (siehe Kapitel 7.1.1), ihrer gesundheitsfördernden Wirkung auf die Raumluft, ihrer Brandresistenz und ihrem feuchtdynamischen Verhalten auszeichnet. Zudem ist sie sehr ökologisch, da man sie in fast jedem Land regional erhalten kann, somit werden lange Transportwege erspart. Sie ist nachwachsend und kann problemlos entsorgt werden. Wichtig ist aber für die Kompostierung, dass die Wolle mit einem biologischen Wollschutzmittel versehen ist, wie zum Beispiel das Neemöl.

8. Die optimalste Kombination der Dämmstoffe

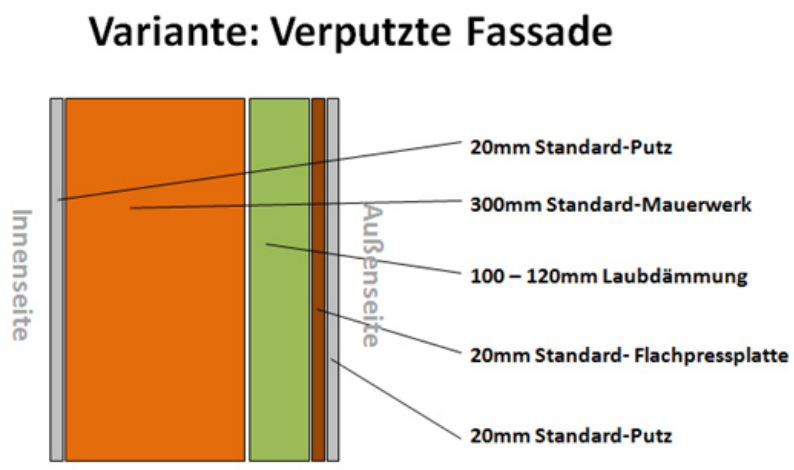
Dank der Ergebnisse im letzten Kapitel überlegten wir uns nun die optimale Kombination der einzelnen Dämmstoffe. Diese besteht aus dem besten Kompromiss zwischen Umweltfreundlichkeit, Dämmfähigkeit und Wirtschaftlichkeit. Bei einem gewöhnlichen Wohnhaus gibt es drei grundlegende Möglichkeiten der Dämmung, eine Fassadendämmung, eine Dachdämmung und eine Dämmung, die bereits in die einzelnen Ziegelsteine integriert ist.

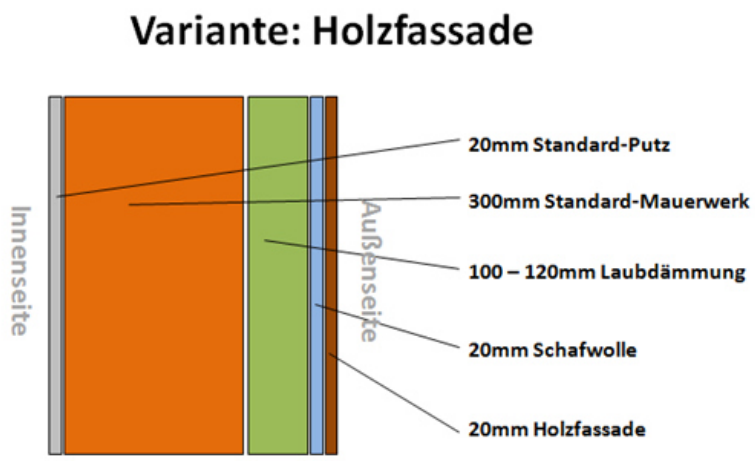
8.1 Die Fassadendämmung

Die Fassadendämmung bietet eine äußerst effiziente Möglichkeit große Hauswände mit relativ wenig Aufwand gut zu dämmen. Sie ist sehr flexibel, da sie einfach nur auf die Außen- oder Innenseite der Hauswand angebracht wird. Deshalb eignet sich die Fassadendämmung auch gut für Renovierungsarbeiten, oder schlichtes Nachrüsten am Gebäude.

Styrodur kann beispielsweise direkt auf die Ziegelsteine aufgeklebt werden und anschließend von außen her verputzt werden. Für andere Dämmstoffe, wie zum Beispiel Perlite, Mineralwolle oder eben auch Laub wird eine zusätzliche Schicht aus stabilen Holzplatten benötigt, um die Wand verputzen zu können. Die Stärke der Dämmung kann hierbei variieren, fast alle Fassadendämmungen haben allerdings eine Stärke von 10mm, 12mm oder 15mm, da dies die Standardmaße bei der Herstellung sind. Der optimale Aufbau

einer Fassadendämmung würde demnach wie in den folgenden Skizzen beschrieben aussehen. Hierbei sind zwei verschiedene Varianten angedacht, zum einen eine Fassade aus Holz, bei der es unseren Ergebnissen nach (siehe Kapitel 7) ratsam wäre eine ca. 2cm starke Schicht Schafwolle als zusätzlichen Schutz des Laubes vor Feuchtigkeit und Schädlingen zwischen den Holzplatten und dem Laub einzufügen (siehe Bild rechts unten). Bei diesem Wandaufbau testeten wir zusätzlich die Dämmfähigkeit an einem Modellaufbau im Maßstab 1:6 (3mm Holz, 3mm Schafwolle, 17mm Weide-und Trompetenbaumlaub-mischung). Die Versuche (siehe Diagramm Kapitel 7.1.1, Messergebnisse: Anhang: Tab.43) ergaben einen hervorragenden U-Wert von 1,484$\frac{W}{m^2 \times K}$ und dämmt damit deutlich besser als Styrodur. Eine solche Maßnahme ist unserer Meinung nach bei der Variante mit einer verputzten Fassade (siehe Bild rechts oben) nicht notwendig, da durch die ca. 4cm starke Kombination von Putz und Holz eine ausreichende Feuchtigkeits- und Schädlingsresistenz gewährt sein sollte. In beiden Fällen hat die Holzschicht noch zusätzlich eine schalldämmende Wirkung (siehe Kapitel 7.2).





Die beiden Skizzen stellen jeweils eine Außendämmung dar, aber natürlich ist mit diesem Verfahren auch eine Innendämmung möglich.

8.2 Die in den Ziegelstein integrierte Dämmung

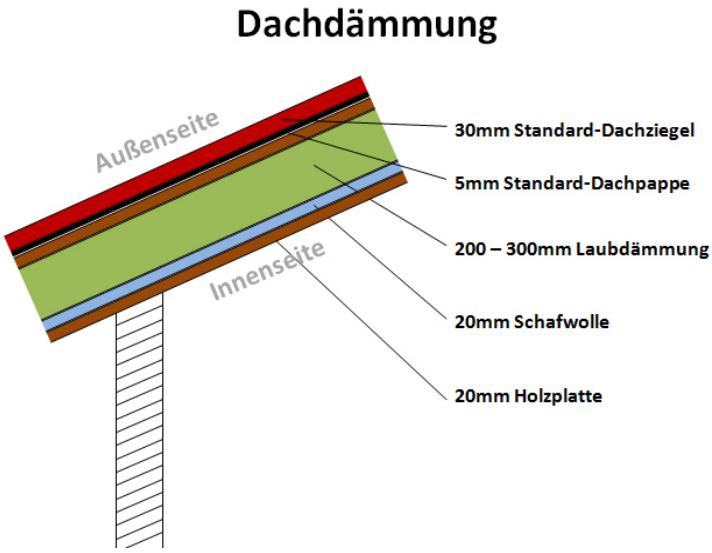
Eine weitere Möglichkeit eine Hauswand zu dämmen, besteht darin schon beim Bau spezielle Ziegelsteine zu verwenden, in denen der Dämmstoff bereits integriert ist (siehe Bild nächste Seite). Bei Neubauten ist dies die heutzutage am weitesten verbreitete Form der Dämmung, bei Sanierungen ist diese Art der Dämmung allerdings unsinnig, da zur Dämmung die gesamte Hauswand abgerissen und anschließend neu aufgebaut werden müsste. In den meisten Fällen werden hierbei Perlite, also extrem leichte Vulkangesteine als Dämmstoff

eingesetzt. Es ist aber prinzipiell auch bei allen anderen Füllungen, wie zum Beispiel auch Laub, Mineralwolle oder Styropor möglich. Die Vorgehensweise ist immer dieselbe, nach der Herstellung von herkömmlichen Ziegelsteinen, werden deren Hohlräume mit der entsprechenden Dämmung aufgefüllt und als Ganzes verbaut. Der große Vorteil liegt darin, dass beim Vermauern der einzelnen Ziegel die Hohlräume inklusive der Dämmung luftdicht verschlossen werden, und somit sehr feuchtigkeits-, schädlings- und brandresistent sind. Speziell für Laub bedeutet dies, dass keine weiteren Mittel zum Schutz benötigt werden, sondern das Laub direkt in die Ziegel gefüllt werden kann. Der Nachteil dieser Dämmung liegt darin, dass sie nur sehr aufwendig ausgetauscht werden kann. Durch zu große Hohlräume im Ziegel kann es zudem zu Stabilitätsverlusten kommen.

8.3 Die Dachdämmung

Eine zentrale Rolle bei der Dämmung eines Hauses spielt das Dach. Durch die Tatsache, dass warme Luft aufsteigt, ist es unmittelbar unterhalb des Daches meistens ein wenig wärmer als anderswo im Haus. Deshalb und begünstigt durch die große Fläche entweicht ein Großteil der Wärme durch das Dach, weshalb eine effiziente Wärmedämmung hier besonders wichtig ist. In fast allen Fällen wird die Dachdämmung entweder in die Lücken zwischen den tragenden Holzbalken oder wenn die Holzkonstruktion von innen her sichtbar bleiben soll, in einen eigenen speziell für die Dämmung geschaffenen Hohlraum darüber verlegt. Prinzipiell lässt sich jede Dämmung in die Hohlräume einfügen, am häufigsten besteht die Dachdämmung allerdings aus Mineralwolle (siehe Bild rechts). Das Prinzip ist mehr oder weniger dasselbe wie bei der Fassadendämmung, nur dass in der Dachdämmung meistens eine stärkere Dämmung von 200 – 300mm verbaut wird.

Wie schon bei der Fassadendämmung beschrieben bietet es sich auch hier an eine zusätzliche Schicht Schafwolle an der Unterseite des Laubes als zusätzliche Schutzschicht für das Laub anzubringen. Auf der Oberseite des Laubes ist dies unserer Ansicht nach nicht nötig, da das Laub hier durch die Dachpappe ausreichend vor Feuchtigkeit, Schädlingen und Witterung geschützt sein sollte. Der optimale Aufbau für eine Dachdämmung ist der Skizze oben rechts zu entnehmen.



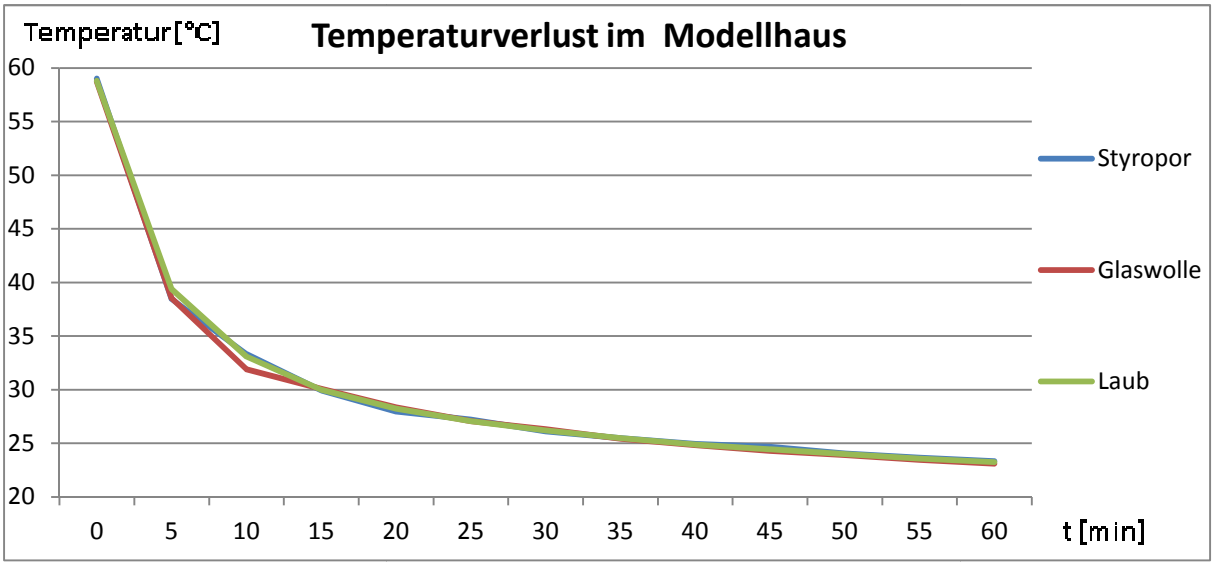
9. Versuche an einem eigens gebauten Modellhaus

Bau des Hauses

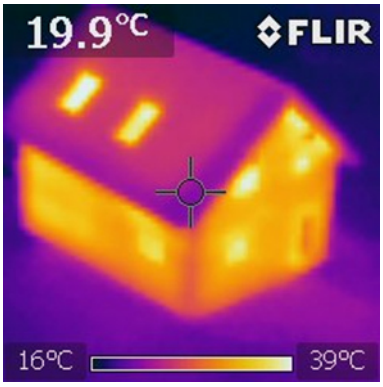
Um die Wirtschaftlichkeit ungefähr abschätzen zu können, entwickelten wir den Plan für ein Modellhaus, welches in Bezug auf alle wichtigen Aspekte und von der baulichen Struktur her einem durchschnittlichen deutschen Einfamilienhaus entspricht. Die erforderlichen Daten hierzu recherchierten wir in der Zusatzerhebung zur Wohnsituation im Mikrozensus 2010 [18]. Diesen Plan verwirklichten wir dann, indem wir das Haus im Maßstab 1:20 aus realitätsnahen Mini-Ziegelsteinen bauten (siehe Abbildung rechts oben). Das Haus besteht aus zwei Stockwerken, wobei diese nicht miteinander verbunden sind um auch im Haus Arbeiten vornehmen zu können. Um möglichst exakte Werte zu erreichen teilten wir das Haus in verschiedene Räume ein, deren Wände ebenfalls gemauert wurden. Die Bodenplatte bildet eine massive 20mm Betonplatte. Im Haus sind acht Fenster und drei Dachfenster aus 3mm starkem Plexiglas und mit einem Holzrahmen verbaut. Ähnlich einem normalen Haus verputzten wir die Außenwände mit Mörtel. Der Dachstuhl besteht aus kleinen Holzbalken und das Dach selbst ist mit realistischen Miniatur-Dachziegeln gedeckt. Alles in allem ist das Dach genauso aufgebaut wie unter dem Kapitel 8.3 „Dachdämmung“ beschrieben. Um die Dachdämmung je nach Testmaterial zu variieren ist am Dach die äußere Holzschicht inklusive der Dachziegel abnehmbar. Damit die Möglichkeit besteht, die Hauswände auch mit einer Innendämmung zu versehen, ist im Abstand von 5mm zur Außenmauer eine 4mm starke Holzverschalung aus Holz angebracht, hinter der der Dämmstoff eingebaut ist (siehe Fassadendämmung). Zudem dokumentierten wir den Bau ausführlich (siehe Bilder im Anhang III.).

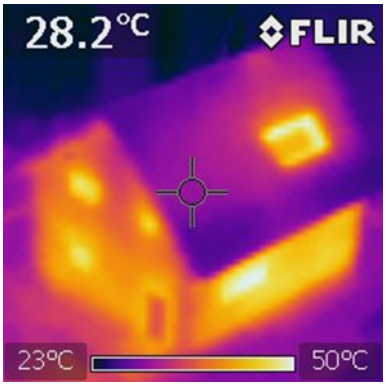
Versuchsaufbau und Ergebnisse

Nach der Fertigstellung beabsichtigten wir, weitere Messungen zur Dämmfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von Laub mithilfe des Hauses durchzuführen. Um möglichst genaue Messwerte zu erhalten befestigten wir in jedem Raum ein Thermometer. Mit einem Heißluftföhn versuchten wir die Luft im Inneren des Hauses auf durchschnittlich 60°C zu erwärmen, um eine einstündige Messreihe zu erhalten. Dieser Versuchsaufbau scheiterte, da die Luft im Haus nicht genügend zirkulieren konnte, wodurch sich die Räume nicht gleichmäßig erwärmten. Am höchsten stiegen die Werte im Treppenhaus, da hier ein Durchzug stattfand. Leider war es uns nicht möglich alternative Wärmequellen zu finden, da die meisten zu groß für unser Vorhaben waren. Daher blieb uns keine andere Möglichkeit, als die Innenwände zu entfernen. Endlich funktionierte die Wärmezirkulation im Haus, wir verteilten acht Thermometer im Haus und konnten unsere Versuchsreihen nun beginnen. Um Messungenauigkeiten vorzubeugen, führten wir drei Messreihen eines Teststoffs je eine Stunde lang durch und schrieben im Fünfminutentakt die Temperaturen auf. Die Messungen liefen an sich recht gut, allerdings gelang uns keine sinnvolle Auswertung der durch die Thermometer gewonnenen Daten (s. Diagramm unten und Tab.45-47 im Anhang), was sich durch die geringe Größe des Modells und die daraus resultierenden minimalen Temperaturspielräume erklären lässt.



Trotzdem ist erkennbar, dass Laub mit Glaswolle und Styrodur mithalten kann. Auch bei der Wärmebildkamera waren keine deutlichen Unterschiede zwischen den Dämmmaterialien zu sehen. Man konnte allerdings beobachten, dass durch die Fenster extrem viel Energie verloren geht. Außerdem kann durch eine Verdopplung der Dämmstärke von 5mm in der Wand auf 10 mm im Dach ein viel besserer Dämmwert erreicht werden (s. Wärmebilder).





10. Die Nachhaltigkeit des Dämmmaterial Laubs

Um überhaupt Aussagen über die Nachhaltigkeit eines Produkts treffen zu können, muss erst einmal dessen genauer Herstellungs- und Verarbeitungsprozess feststehen, also fingen wir damit an uns über den Rohstoff Laub zu informieren.

Dabei stießen wir auf den offiziellen Bericht zur Bundeswaldinventur 2004 [19]. Aus diesem Bericht geht hervor, dass in Deutschland von den insgesamt 11,1 Mio. Hektar Wäldern 4,55 Mio. Hektar, also ca. 41% Laubwälder sind. Leider geht aus dem Bericht zudem hervor, dass der Anteil von Weide und Trompetenbaum, also unseren beiden am besten dämmenden Laubarten verschwindend gering ist. Für eine kommerzielle Nutzung von Laub gibt es nun zwei Möglichkeiten, entweder man baut auf speziellen Plantagen nur die relevanten Baumarten Weide und Trompetenbaum an. Dies ist eine sehr kostenintensive Variante, da es zum einen Jahre dauern würde, bis die Bäume ertragreich wären und man zum anderen bei der gegenwärtigen Nachfrage von Dämmstoffen riesige Anbaufläche bräuchte um die Nachfrage befriedigen zu können. Die zweite Möglichkeit würde nur einen Bruchteil dieser Kosten verursachen: Man kauft ganz gewöhnliches Laub von Privatpersonen, Kommunen und Städten auf, bzw. holt dieses lediglich von den betreffenden Stellen kostenlos ab um es

anschließend weiterzuverarbeiten. Diese Variante wäre zudem umweltfreundlicher, da keine neuen Anbauflächen für Plantagen geschaffen werden müssten. Da sich dieses System des Recyclings bisher sowohl bei Altpapier und Kunststoffen (Gelbe-Tonne) als auch inzwischen bei Bioabfällen (Bio-Tonne) durgesetzt hat, ist anzunehmen, dass das gleiche Prinzip ohne größere Probleme bei Laub-Abfällen greifen würde.

Des Weiteren lässt sich aus dem Bericht zur Bundeswaldinventur [19] zudem ermitteln, dass Eiche und Buche zusammen ca. 24,4% der gesamten Waldfläche ausmachen, somit stellen diese beiden Baumarten etwa 60% der gesamten Laubwaldfläche, und damit auch ca. 60% des gesamten Laubes in Deutschland. Die anderen 40% teilen sich Ahorn, Esche, Linde, Birke, Pappel und Erle und zahlreiche noch kleinere Populationen. Somit war klar, bei einer Nutzung von Laub im großen Maßstab würden sich Buchen- und Eichenblätter am ehesten eignen, da diese mit deutschlandweit ca. 2,7 Mio. Hektar Buchen- und Eichenwälder mit sich alljährlich neu regenerierenden Laubbeständen ein fast unbegrenzt vorhandener Rohstoff sind.

Nach dieser Erkenntnis testeten wir unsere wie schon in Kapitel 9.1 erforschte „optimale Dämmung“ erneut, diesmal allerdings mit einer Buchen-Eichen-Laubmischung als Dämmstoff. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe mit einem Ergebnis von 1,739 $\frac{W}{m^2 \times K}$ (s. Anhang Tab. 44) zeigten uns, dass durch die einfache Kombination von Buche und Eiche die Dämmfähigkeit um -0,11 $\frac{W}{m^2 \times K}$ gegenüber der von reiner Eiche (1,852 $\frac{W}{m^2 \times K}$) und um über -0,21 $\frac{W}{m^2 \times K}$ gegenüber der von reiner Buche (1,952 $\frac{W}{m^2 \times K}$) zunahm (vgl. Kapitel 7.1.1). Diese Laubmischung in Kombination mit Schafwolle und Holz dämmt also praktisch genau so gut wie herkömmliches Styrodur (1,723 $\frac{W}{m^2 \times K}$).

Damit war ein optimaler Kompromiss zwischen einer bestmöglichen Wärmedämmung und einer hohen Wirtschaftlichkeit geschlossen. Da nun alle Fragen bezüglich des Rohmaterials geklärt waren, kommen wir nun also zur Weiterverarbeitung und zum Endprodukt:

Reinigung

Das Laub muss als erstes von allen anderen Stoffen (z.B. Äste, Erde, Sand, Knollen, Nadeln, usw.) gereinigt werden. Dies ist mit verschiedenen Verfahren (z.B. Sedimentieren, Abscheiden, Sieben) möglich. Die Reinigung kann auch aus mehreren Stufen bestehen.

Sterilisation

In einem weiteren Arbeitsschritt muss das Laub sterilisiert werden, das heißt es werden alle Insekten, Pilze und Bakterien abgetötet. Damit man das Laub von diesen überhaupt reinigen kann, muss man allerdings zuerst wissen, welche Schädlinge sich auf dem Laub befinden. Deshalb wollten wir in der Schule einen Abstrich des Laubes nehmen und dies auf einen Nährboden in einer Petrischale geben. Nach ein paar Tagen wären dann wahrscheinlich Bakterienkulturen sichtbar gewesen. Diese hätte man bestimmen und dann eine speziell für diese wirksame Imprägnierung finden können. Leider war dies nicht möglich, da die neuen Verhaltensregeln der GUV Bayern solche Versuche verbieten. Es könnten nämlich krankheitserregende Bakterien, wie zum Beispiel Tetanusbakterien entstehen. Somit wurde es uns verwehrt, hinsichtlich dieser Sache weitere Untersuchungen zu führen um eine geeignetes Verfahren zur Sterilisation zu entwickeln. Eine Möglichkeit, die Schädlinge zu beseitigen, wäre die Abtötung durch extreme Kälte, Hitze oder ein Vakuum. Vor einer

Markteinführung müssten diese Untersuchungen noch an einer geeigneten Forschungseinrichtung weitergeführt werden.

Zerkleinerung

Damit Laub am besten dämmt, sollte es zerkleinert werden. Es sollte möglichst viel Luft dazwischen eingeschlossen sein, um optimale Dämmeigenschaften zu erhalten. Dies ist nicht bei ganzen Blättern gewährleistet. Bei unserer Versuchsreihe zerkleinerten wir das Laub, indem wir es mit den Händen zerrieben. Für ein Massenprodukt kann dies nur maschinell geschehen mit zwei Reibeplatten, zwischen denen das Laub zerstückelt wird.

Optionale Weiterverarbeitung

Vorstellbar wäre auch zerkleinertes Laub zu komprimieren, sodass Laubdämmplatten entstehen. Diese könnte man an den Außenseiten leicht imprägnieren und sie so feuchtigkeits- und brandresistent machen. Zu diesem Ansatz würden wir gerne weitere Forschungen anstellen, da wir bei dieser Form der Dämmung von einer relativ großen Nachfrage ausgehen. Diese Variante der Laub-Dämmung ist zwar durch das pressen der Laubplatten und den dadurch höheren Verbrauch an Laub etwas weniger umweltfreundlich. Laubdämmplatten könnten nach dem gleichen Prinzip wie Holzfaserdämmplatten gepresst werden, wodurch auf die schon bestehende Infrastruktur dieser Industrie aufgebaut werden kann. Zum verkleben des Laubes kann ebenfalls handelsüblicher, umweltfreundlicher Holzleim genutzt werden.

Eine weitere Möglichkeit wäre es das Laub in Schafwolltaschen zu füllen. Auch hier ist das Laub gegen Feuchtigkeit und Feuer geschützt. Außerdem können Schafwolltaschen als Dämmung leichter angebracht werden.

Ob diese Option auch für die Industrie besteht, müsste vorab allerdings noch geklärt werden.

Verpackung

Wenn das Laub soweit bearbeitet ist, kann es, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, als Dämmung genutzt werden. Für den Verkauf sollte zudem eine umweltfreundliche Verpackung der Dämmung berücksichtigt werden, zum Beispiel recyceltes Papier.

Endprodukt

Der Dämmstoff Laub müsste am Ende eines sehr einfachen und kurzen Produktionsprozesses sowohl preislich als auch qualitativ gut mit herkömmlichen Dämmstoffen konkurrieren können.

10.1 Vorteile im Bereich Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit

Laub ist ein reines Naturprodukt, das große Potenzial von Laub liegt in seiner Nachhaltigkeit. Da es ein nachwachsender Rohstoff ist, geht es im Vergleich zu allen anderen herkömmlichen Dämmstoffen nie aus. Großes Potenzial liegt außerdem in der regionalen Verfügbarkeit von Laub, dadurch wäre auch eine regionale Verarbeitung möglich, welche lange Transportwege , wie sie bei allen herkömmlichen Dämmstoffen üblich sind, auf ein

absolutes Minimum reduzieren. Der schon zuvor beschriebene Produktionsprozess lässt wiederum im Gegensatz zu den Herstellungsprozessen herkömmlicher Dämmmaterialien einen minimalen Ressourcen- und Energieverbrauch vermuten.

10.2 Mögliche Risiken einer intensiven Laubnutzung

Trotz längerer Recherche konnten wir keine direkten Risiken einer zu intensiven Laubnutzung finden. Theoretisch wäre es allerdings möglich, dass es bei einer extremen Laubnutzung zu einem kleineren Anteil an Humus-Bildung kommen könnte, was wiederum negative Folgen für das Ökosystem Wald haben könnte. Diese Furcht ist unserer Meinung nach allerdings angesichts der gigantischen Menge zur Verfügung stehenden Laubes unbegründet, außerdem wird Humus zudem auch aus allen anderen organischen Verbindungen gewonnen.

11. Fazit

In den vergangenen drei Jahren, in denen wir uns nun bereits mit der Thematik „Nachhaltige Dämmstoffe“ beschäftigten, wurden wir durch viele Versuche und theoretische Überlegungen immer mehr von dem ungenutzten Potenzial des Laubs als Dämmstoff überzeugt. Letztendlich sind wir zu der festen Überzeugung gekommen, das Laub durchaus ein zukunftsträchtiges und konkurrenzfähiges Dämmmaterial werden könnte, wenn auch die Industrie dessen Potenzial erkennt. In facto Umweltfreundlichkeit werden andere Dämmmaterialien nur schwer mit Laub mithalten können.
Wir sind der Meinung, dass unser Konzept zur industriellen Umsetzung von Laub als Dämmstoff schon sehr ausgereift ist, dennoch würden wir uns über das Interesse seitens der Industrie und Öffentlichkeit und den daraus resultierenden Möglichkeiten zur weiteren Forschung sehr freuen. Vor allem Versuche im größeren Maßstab, bei denen unsere theoretischen Überlegungen umgesetzt und genauer erforscht werden können, sind wichtig für eine weitere Ausarbeitung unseres Konzepts. Außerdem wäre ein Praktizieren der Versuche, die uns leider nicht möglichen waren, eine grundlegende Voraussetzung.
Wir hoffen, dass unsere Ideen zu einem umweltfreundlichen, qualitativ hochwertigen und zugleich wirtschaftlichen Dämmstoff schon bald dazu beitragen können, noch verantwortlicher und umweltbewusster zu dämmen.

12. Quellenangaben

Einzelnachweise:

[1] TU München/Institut für Entwerfen und Bautechnik (http://www.holz-tum.de/upload/material/1181834463_material_.pdf) (14.03.2014 | 12:37)

[2] EnergieAgentur Mittelfranken/ Altbautage Mittelfranken 2007 (http://www.eamfr.de/service/Daemmstoffe.pdf) (12.11.2011 | 16:44)

[3] http://www.isover.de/Portaldata/1/Resources/downloads/preislisten/Preisliste_

VacuPad_VP02.pdf (12.11.2011 | 21:16)

[4] Gerthsen Physik, Springer-Verlag

[5] http://de.wikipedia.org/wiki/Aluminium (14.03.2014 | 12:52)

[6] http://www.dekorplus.de/downloads/fassadendaemmplatte-035.pdf (14.03.2014 | 12:53)

[7] http://www.radio101.de/waermedaemmung/u-wert.htm (14.03.2014 | 12:53)

[8] http://de.wikipedia.org/wiki/Luftdichte (14.03.2014 | 12:57)

[9] http://de.wikipedia.org/wiki/Wärmeleitfähigkeit (14.03.2014 | 12:58)

[10] http://www.gesundbauen.at/BER3-BTE.htm (14.03.2014 | 12:59)

[11] Landesagentur für Umwelt und Arbeitsschutz (http://www.klimahaus.it) (14.03.2014 | 13:05)

[12] http://www.baulinks.de/baumaterial/lambda-werte-waermeleitzahl-waermeleitfaehigkeit- waermedaemmung.php (14.03.2014 | 13:06)

[13] http://www.umweltschutz-bw.de/?lvl=983 (14.03.2014 | 13:06)

[14] http://de.wikipedia.org/wiki/Eigenschaften_des_Wassers (14.03.2014 | 13:08)

[15] http://www.sengpielaudio.com/Rechner-pegelaenderung.htm (14.03.2014 | 13:10)

[16] http://www.thermalan.de/downloads/thermalan_Mottenschutz.pdf (14.03.2014 | 13:11)

[17] http://www.amazon.com (14.03.2014 | 13:12)

[18] Statistisches Bundesamt (Mikrozensus – Zusatzerhebung 2010, Bestand und Struktur der Wohneinheiten Wohnsituation der Haushalte) (http://www.reuter-quartier.de/uploads/media/Mikrozensus_Wohnsituation_2010.pdf) (14.03.2014 | 13:14)

[19] Institut für Waldökologie und Waldinventur/Bundeswaldinventur 2004 (http://www.bundeswaldinventur.de/media/archive/528.pdf) (14.03.2014 | 13:15)

[20] http://www.waermedaemmstoffe.com (12.11.2011 | 13:12)

Weitere Quellen:

http://de.wikipedia.org/wiki/Asbest

http://de.wikipedia.org/wiki/Asbestose

http://de.wikipedia.org/wiki/D%C3%A4mmstoff

http://de.wikipedia.org/wiki/Wärmedurchgangskoeffizient

http://de.wikipedia.org/wiki/Wärmeleitung

http://de.wikipedia.org/wiki/Styrol

http://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol

http://de.wikipedia.org/wiki/Polyurethan

http://de.wikipedia.org/wiki/Mineralwolle

http://de.wikipedia.org/wiki/Perlite

http://www.naturbauhof.de/lad_daemm_perlite.php

http://www.knauf-perlite.de/industrie/perlit.html

http://www.schweizer-fn.de/stoff/wkapazitaet/v2_wkapazitaet_isolierung.htm

http://www.vip-bau.de/pdf/1_vip_bau/r_caps.pdf

http://www.crtib.lu/Leitfaden/content/DE/116/C507

http://www.tremco-illbruck.de/service_downloads/abdichtungs_abc/00443/index.html

http://baustoffe.fnr.de/daemmstoffe/materialien/schafwolle/

http://www.fachwerk.de/fachwerkhaus/wissen/daemmung-schafswolle-8199.html

http://www.wollstudio.com/pages/anleitungen.html

http://www.gesundes-haus.ch/waermedaemmung-isolierung/materialbeschreibung-waermedaemmung.html

http://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Schafwolle%20D%C3%A4mmstoffe

http://www.bauen.de/ratgeber/ausbau-renovierung/daemmung/daemmstoffe/artikel/artikel/daemmmaterial-schafwolle-ein-pullover-fuer-das-haus.html

https://de.wikipedia.org/wiki/Schafwolle_als_D%C3%A4mmstoff

http://www.klimalan.com/produkte/mottenschutz/

http://daemwool.at/de/unternehmen/herstellungsprozess.html

http://www.sentinel-haus-stiftung.eu/fileadmin/sentinel-hausstiftung/PDF_Dateien/Thorlan_Bewertung__SHS.pdf

https://de.wikipedia.org/wiki/Neem%C3%B6l

http://www.allum.de/stoffe-und-ausloeser/sanierung/neembaumoel-azadirachtin

Bildnachweise:

Seite 4, Expandiertes Polystyrol:
http://www.energiesparen-im-haushalt.de/daemmung/polystyrol-eps.jpg (14.03.2014 | 13:21)

Seite 4, Mineralwolle:
http://trockenbau-radstadt.at/images/mineralwolle.jpg (14.03.2014 | 13:22)

Seite 5, Aerogel:
http://eetd.lbl.gov/newsletter/cbs_nl/nl08/images/aerogel_flame.gif (14.03.2014 | 13:22)

Seite 5, Vakuumdämmplatten:
http://www.bitbau.at/images/vacu1.jpg (14.03.2014 | 13:23)

Seite 26, Ziegelstein mit Perlitfüllung:
http://www.poroton.org/images/content/Pressematerial_2011/PM_11_2011/POR-11-2011_Bild-01_perlitgefuellte_Ziegel_300dpi.jpg (14.03.2014 | 13:23)

Seite 26, Dachdämmung mit Mineralwolle:
http://www.thema-energie.de/typo3temp/pics/247c43e2c3.jpg (14.03.2014 | 13:24)

Anmerkung:

Am 14.03.2014 überprüften wir noch einmal alle Einzelnachweise und Bildnachweise, dabei stellten wir fest, dass die Links für die Einzelnachweise [2] und [3] nicht mehr existierten.

Anhang:

I. Bilder

Bilder zu den verschiedenen Materialien aus Kapitel 6.3:

Stoff

Papierschnipsel

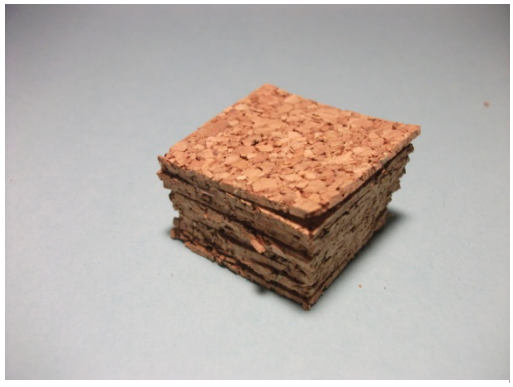
Holzspäne

Holzwolle

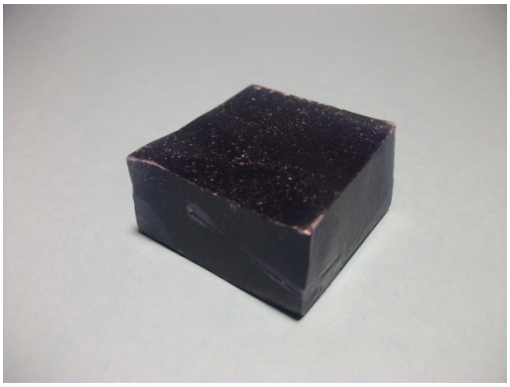
Laub

Haare

Pappe



Kork



Wachs

Fichtennadeln

Humus

Sand

Kokosnussfaser

Schafwolle

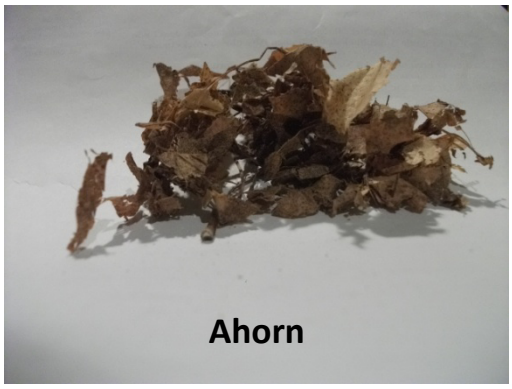
Sägemehl

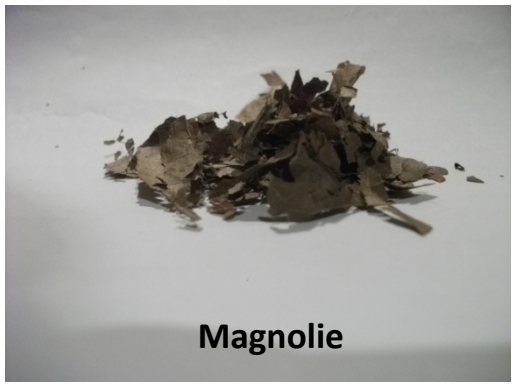
Moos

Stroh

Perlit

Bilder zu den verschiedenen Laubarten aus Kapitel 8.1:





II. Tabellen

Die nachfolgenden Tabellen beinhalten alle Messwerte unseres Forschungsprojekts.

Tabellen zu Kapitel 5.3:

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: ohne Dämmmaterial				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,3	58,4	58,1	**58,27**
4,0	57,0	57,1	56,7	**56,93**
6,0	55,2	55,6	55,4	**55,40**
8,0	54,2	54,6	54,2	**54,33**
10,0	53,1	53,4	53,1	**53,20**
12,0	51,1	52,4	52,1	**51,87**
14,0	51,1	51,4	51,1	**51,20**
16,0	49,7	50,0	49,6	**49,77**
18,0	48,8	49,1	48,8	**48,90**
20,0	47,8	48,3	48,0	**48,03**
22,0	46,8	47,6	47,1	**47,17**
24,0	45,9	46,8	46,4	**46,37**
26,0	45,1	45,9	45,6	**45,53**
28,0	44,3	45,2	44,9	**44,80**
30,0	43,7	44,5	44,1	**44,10**
32,0	43,1	43,9	43,5	**43,50**
34,0	42,4	43,1	42,9	**42,80**
36,0	41,9	42,5	42,3	**42,23**
38,0	41,4	41,9	41,6	**41,63**
40,0	40,8	41,3	41,1	**41,07**
42,0	40,4	40,7	40,5	**40,53**
44,0	39,9	40,2	40,0	**40,03**
46,0	39,5	39,8	39,5	**39,60**
48,0	39,0	39,3	39,1	**39,13**
50,0	38,5	38,8	38,6	**38,63**
52,0	38,1	38,3	38,2	**38,20**
54,0	37,7	37,8	37,7	**37,73**
56,0	37,3	37,4	37,3	**37,33**
58,0	36,9	36,9	36,9	**36,90**
60,0	**36,5**	**36,6**	**36,5**	**36,53**

Tab. 1

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Stoffe				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	57,9	58,3	59,1	**58,43**
4,0	56,7	56,7	57,9	**57,10**
6,0	55,4	55,6	56,9	**55,97**
8,0	54,5	54,8	55,3	**54,87**
10,0	53,8	54,0	54,4	**54,07**
12,0	52,9	53,1	53,6	**53,20**
14,0	52,2	52,4	52,7	**52,43**
16,0	51,4	51,6	51,9	**51,63**
18,0	50,4	50,6	51,1	**50,70**
20,0	49,4	49,6	49,9	**49,63**
22,0	48,8	49,0	49,1	**48,97**
24,0	48,1	48,4	48,4	**48,30**
26,0	47,4	47,8	47,7	**47,63**
28,0	46,8	47,1	47,1	**47,00**
30,0	46,1	46,5	46,4	**46,33**
32,0	45,5	45,9	45,8	**45,73**
34,0	45,0	45,3	45,2	**45,17**
36,0	44,3	44,8	44,6	**44,57**
38,0	43,8	44,0	44,1	**43,97**
40,0	43,3	43,4	43,4	**43,37**
42,0	42,8	43,0	42,9	**42,90**
44,0	42,3	42,4	42,4	**42,37**
46,0	41,9	42,1	42,0	**42,00**
48,0	41,4	41,6	41,5	**41,50**
50,0	41,0	41,1	41,1	**41,07**
52,0	40,6	40,7	40,6	**40,63**
54,0	40,3	40,3	40,1	**40,23**
56,0	39,9	39,9	39,9	**39,90**
58,0	39,5	39,6	39,3	**39,47**
60,0	**39,1**	**39,2**	**38,9**	**39,07**

Tab. 2

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Papierschnipsel				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,9	58,9	58,9	**58,90**
4,0	58,0	58,0	57,9	**57,97**
6,0	57,1	57,1	57,0	**57,07**
8,0	55,7	55,7	55,6	**55,67**
10,0	54,8	54,8	54,6	**54,73**
12,0	53,9	53,9	53,8	**53,87**
14,0	53,1	53,1	52,9	**53,03**
16,0	52,3	52,2	52,3	**52,27**
18,0	51,4	51,3	51,5	**51,40**
20,0	50,5	50,2	50,6	**50,43**
22,0	49,5	49,3	49,6	**49,47**
24,0	48,8	48,6	48,9	**48,77**
26,0	48,1	47,8	48,2	**48,03**
28,0	47,3	47,4	47,5	**47,40**
30,0	46,7	46,9	46,9	**46,83**
32,0	46,0	46,3	46,2	**46,17**
34,0	45,4	45,8	45,5	**45,57**
36,0	44,8	45,1	44,9	**44,93**
38,0	44,3	44,6	44,3	**44,40**
40,0	43,8	44,1	43,7	**43,87**
42,0	43,1	43,6	43,1	**43,27**
44,0	42,6	42,9	42,5	**42,67**
46,0	42,1	42,4	42,0	**42,17**
48,0	41,5	41,9	41,5	**41,63**
50,0	41,0	41,4	41,1	**41,17**
52,0	40,6	41,0	40,7	**40,77**
54,0	40,1	40,5	40,3	**40,30**
56,0	39,6	40,1	39,9	**39,87**
58,0	39,2	39,6	39,4	**39,40**
60,0	**38,8**	**39,3**	**39,1**	**39,07**

Tab. 3

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Hobelspäne				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,3	58,3	58,8	**58,47**
4,0	57,3	57,0	57,6	**57,30**
6,0	56,0	55,6	56,3	**55,97**
8,0	55,1	54,7	55,0	**54,93**
10,0	54,3	53,9	54,0	**54,07**
12,0	53,5	53,2	53,0	**53,23**
14,0	52,8	52,4	52,1	**52,43**
16,0	51,9	51,6	51,2	**51,57**
18,0	51,2	50,8	49,9	**50,63**
20,0	49,9	49,6	49,1	**49,53**
22,0	49,3	49,0	48,4	**48,90**
24,0	48,6	48,3	47,6	**48,17**
26,0	47,9	47,7	46,9	**47,50**
28,0	47,2	47,1	46,3	**46,87**
30,0	46,7	46,4	45,6	**46,23**
32,0	46,0	45,8	45,0	**45,60**
34,0	45,4	45,2	44,4	**45,00**
36,0	44,9	44,7	43,8	**44,47**
38,0	44,3	44,1	43,3	**43,90**
40,0	43,8	43,6	42,8	**43,40**
42,0	43,3	43,1	42,3	**42,90**
44,0	42,8	42,7	41,9	**42,47**
46,0	42,3	42,3	41,3	**41,97**
48,0	41,9	41,7	40,8	**41,47**
50,0	41,4	41,4	40,4	**41,07**
52,0	40,9	41,0	39,9	**40,60**
54,0	40,6	40,5	39,6	**40,23**
56,0	40,2	40,1	39,1	**39,80**
58,0	39,8	39,8	38,8	**39,47**
60,0	**39,4**	**39,4**	**38,3**	**39,03**

Tab. 4

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Styrodur				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,7	59,2	58,9	**58,93**
4,0	57,8	58,4	57,9	**58,03**
6,0	57,3	57,5	56,9	**57,23**
8,0	56,6	56,3	55,5	**56,13**
10,0	55,1	55,3	54,5	**54,97**
12,0	54,7	54,4	54,5	**54,53**
14,0	53,9	53,9	53,6	**53,80**
16,0	53,0	52,8	52,6	**52,80**
18,0	52,4	52,1	51,6	**52,03**
20,0	51,7	51,4	50,2	**51,10**
22,0	51,1	50,4	49,4	**50,30**
24,0	50,0	49,7	47,8	**49,17**
26,0	49,5	49,1	47,4	**48,67**
28,0	48,8	48,6	46,9	**48,10**
30,0	48,2	48,0	46,9	**47,70**
32,0	47,7	47,4	46,4	**47,17**
34,0	47,1	46,9	45,8	**46,60**
36,0	46,6	46,0	45,4	**46,00**
38,0	46,0	45,4	44,7	**45,37**
40,0	45,1	45,1	43,9	**44,70**
42,0	44,4	44,6	43,3	**44,10**
44,0	44,3	44,1	42,8	**43,73**
46,0	43,9	43,7	42,4	**43,33**
48,0	43,3	43,3	42,0	**42,87**
50,0	42,9	42,8	41,5	**42,40**
52,0	42,6	42,4	41,1	**42,03**
54,0	42,1	42,1	40,7	**41,63**
56,0	41,8	41,7	40,3	**41,27**
58,0	41,4	41,3	39,8	**40,83**
60,0	**41,0**	**40,9**	**39,4**	**40,43**

Tab. 5

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Holzwolle				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,1	58,9	59,0	**59,00**
4,0	58,3	57,9	58,0	**58,07**
6,0	57,3	57,1	57,0	**57,13**
8,0	55,9	55,8	55,6	**55,77**
10,0	55,2	54,9	54,7	**54,93**
12,0	54,3	54,1	53,8	**54,07**
14,0	53,5	53,4	52,9	**53,27**
16,0	52,8	52,7	52,1	**52,53**
18,0	52,0	52,0	51,4	**51,80**
20,0	51,3	51,3	50,3	**50,97**
22,0	50,4	50,2	49,4	**50,00**
24,0	49,4	49,4	48,7	**49,17**
26,0	48,8	48,8	48,0	**48,53**
28,0	48,2	48,1	47,3	**47,87**
30,0	47,6	47,5	46,8	**47,30**
32,0	47,0	47,0	46,1	**46,70**
34,0	46,4	46,4	45,4	**46,07**
36,0	45,9	45,9	44,9	**45,57**
38,0	45,4	45,3	44,3	**45,00**
40,0	44,9	44,6	43,8	**44,43**
42,0	44,1	44,2	43,2	**43,83**
44,0	43,7	43,8	42,5	**43,33**
46,0	43,3	43,3	42,0	**42,87**
48,0	42,9	42,6	41,6	**42,37**
50,0	42,2	42,3	41,2	**41,90**
52,0	41,8	41,9	40,4	**41,37**
54,0	41,4	41,6	40,0	**41,00**
56,0	41,1	41,1	39,6	**40,60**
58,0	40,7	40,4	39,3	**40,13**
60,0	**39,8**	**39,9**	**38,9**	**39,53**

Tab. 6

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Laub				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,9	59,1	59,1	**59,03**
4,0	57,8	58,3	58,1	**58,07**
6,0	56,3	57,4	57,1	**56,93**
8,0	54,9	56,3	55,8	**55,67**
10,0	53,9	55,3	54,9	**54,70**
12,0	52,9	54,5	54,1	**53,83**
14,0	51,8	53,7	53,3	**52,93**
16,0	51,1	52,9	52,5	**52,17**
18,0	50,4	52,3	51,8	**51,50**
20,0	49,7	51,6	51,0	**50,77**
22,0	49,1	50,8	49,8	**49,90**
24,0	48,4	49,7	49,1	**49,07**
26,0	47,8	49,1	48,4	**48,43**
28,0	47,2	48,4	47,8	**47,80**
30,0	46,6	47,8	47,1	**47,17**
32,0	46,1	47,3	46,5	**46,63**
34,0	45,5	46,7	45,9	**46,03**
36,0	44,9	46,1	45,3	**45,43**
38,0	44,1	45,6	44,8	**44,83**
40,0	43,6	45,1	44,3	**44,33**
42,0	43,2	44,6	43,8	**43,87**
44,0	42,8	44,1	43,3	**43,40**
46,0	42,4	43,6	42,8	**42,93**
48,0	41,9	43,1	42,4	**42,47**
50,0	41,6	42,6	41,9	**42,03**
52,0	41,1	42,1	41,4	**41,53**
54,0	40,6	41,7	41,0	**41,10**
56,0	40,3	41,3	40,6	**40,73**
58,0	40,3	40,9	40,1	**40,43**
60,0	**39,8**	**40,4**	**39,7**	**39,97**

Tab. 7

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Haare				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,6	59,1	58,8	**58,83**
4,0	57,6	58,1	57,6	**57,77**
6,0	56,8	57,1	56,7	**56,87**
8,0	55,6	55,6	55,4	**55,53**
10,0	54,7	54,6	54,6	**54,63**
12,0	53,9	53,3	53,8	**53,67**
14,0	53,0	52,9	52,9	**52,93**
16,0	52,1	52,2	52,1	**52,13**
18,0	51,4	51,5	51,3	**51,40**
20,0	50,1	50,6	50,2	**50,30**
22,0	49,4	49,5	49,4	**49,43**
24,0	48,8	48,5	48,6	**48,63**
26,0	48,1	48,2	47,6	**47,97**
28,0	47,6	47,6	47,1	**47,43**
30,0	47,0	47,0	46,7	**46,90**
32,0	46,5	46,5	46,1	**46,37**
34,0	46,0	45,9	45,6	**45,83**
36,0	45,4	45,4	45,4	**45,40**
38,0	45,0	44,9	44,5	**44,80**
40,0	44,5	44,3	43,9	**44,23**
42,0	43,9	43,7	43,4	**43,67**
44,0	43,5	43,2	42,9	**43,20**
46,0	43,0	42,7	42,4	**42,70**
48,0	42,6	42,2	41,9	**42,23**
50,0	42,1	41,8	41,4	**41,77**
52,0	41,6	41,3	41,0	**41,30**
54,0	41,3	40,9	40,6	**40,93**
56,0	40,8	40,4	40,1	**40,43**
58,0	40,4	40,1	39,8	**40,10**
60,0	**40,1**	**39,8**	**39,3**	**39,73**

Tab. 8

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Pappe				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,3	58,6	59,5	**59,13**
4,0	58,3	57,6	58,6	**58,17**
6,0	57,2	56,3	57,8	**57,10**
8,0	55,8	55,3	56,7	**55,93**
10,0	55,1	54,4	55,6	**55,03**
12,0	54,2	53,8	54,8	**54,27**
14,0	53,3	52,9	54,0	**53,40**
16,0	52,4	52,2	53,4	**52,67**
18,0	51,6	51,3	52,7	**51,87**
20,0	50,5	50,6	52,0	**51,03**
22,0	49,3	49,6	51,3	**50,07**
24,0	48,4	49,0	50,3	**49,23**
26,0	47,6	48,4	49,4	**48,47**
28,0	46,9	47,8	48,8	**47,83**
30,0	46,3	47,2	48,1	**47,20**
32,0	45,8	46,6	47,5	**46,63**
34,0	45,3	46,1	46,9	**46,10**
36,0	44,8	45,5	46,3	**45,53**
38,0	44,1	45,0	45,7	**44,93**
40,0	43,7	44,6	45,2	**44,50**
42,0	43,2	44,2	44,7	**44,03**
44,0	42,8	43,6	44,1	**43,50**
46,0	42,3	43,2	43,6	**43,03**
48,0	41,8	42,6	43,1	**42,50**
50,0	41,2	42,2	42,7	**42,03**
52,0	40,7	41,6	42,1	**41,47**
54,0	40,1	41,1	41,7	**40,97**
56,0	39,6	40,8	41,3	**40,57**
58,0	39,1	40,4	40,8	**40,10**
60,0	**38,9**	**40,0**	**40,3**	**39,73**

Tab. 9

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Kork				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,9	59,1	59,1	**59,03**
4,0	57,8	58,1	58,0	**57,97**
6,0	56,4	57,3	57,0	**56,90**
8,0	55,2	55,8	55,6	**55,53**
10,0	54,2	54,9	54,8	**54,63**
12,0	53,2	54,3	53,6	**53,70**
14,0	51,5	53,4	53,0	**52,63**
16,0	50,6	52,7	52,1	**51,80**
18,0	50,9	52,1	51,3	**51,43**
20,0	49,2	51,3	50,2	**50,23**
22,0	48,6	50,4	49,4	**49,47**
24,0	47,9	49,5	48,8	**48,73**
26,0	47,2	48,9	48,1	**48,07**
28,0	46,4	48,2	47,4	**47,33**
30,0	45,8	47,6	46,8	**46,73**
32,0	45,0	47,0	46,1	**46,03**
34,0	44,5	46,4	45,6	**45,50**
36,0	43,6	45,8	44,9	**44,77**
38,0	43,1	45,3	44,4	**44,27**
40,0	42,6	44,8	43,9	**43,77**
42,0	42,0	44,2	43,3	**43,17**
44,0	41,6	43,7	43,3	**42,87**
46,0	41,1	43,2	42,8	**42,37**
48,0	40,8	42,7	42,3	**41,93**
50,0	40,3	42,2	41,8	**41,43**
52,0	39,8	41,7	41,3	**40,93**
54,0	39,3	41,3	40,8	**40,47**
56,0	38,9	40,9	40,3	**40,03**
58,0	38,6	40,4	39,8	**39,60**
60,0	**38,4**	**40,3**	**39,1**	**39,27**

Tab. 10

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Wachs				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,3	58,2	56,0	**57,50**
4,0	56,0	55,8	54,9	**55,57**
6,0	54,1	54,3	52,0	**53,47**
8,0	52,5	53,1	50,0	**51,87**
10,0	50,9	51,9	48,9	**50,57**
12,0	49,1	50,7	47,9	**49,23**
14,0	47,9	49,4	47,1	**48,13**
16,0	46,7	48,4	46,3	**47,13**
18,0	45,9	47,6	45,4	**46,30**
20,0	45,1	46,8	44,8	**45,57**
22,0	44,5	46,1	44,1	**44,90**
24,0	43,8	44,7	43,4	**43,97**
26,0	43,2	44,1	42,8	**43,37**
28,0	42,6	43,4	42,3	**42,77**
30,0	42,1	43,3	41,8	**42,40**
32,0	41,5	42,9	41,3	**41,90**
34,0	41,1	42,3	40,6	**41,33**
36,0	40,5	41,8	39,9	**40,73**
38,0	39,9	41,3	39,1	**40,10**
40,0	39,3	40,8	38,8	**39,63**
42,0	38,9	40,4	38,3	**39,20**
44,0	38,5	39,9	37,9	**38,77**
46,0	38,1	39,6	37,5	**38,40**
48,0	37,8	39,1	37,2	**38,03**
50,0	37,4	38,8	37,0	**37,73**
52,0	37,1	38,4	36,5	**37,33**
54,0	36,9	38,2	36,3	**37,13**
56,0	36,3	37,8	36,6	**36,90**
58,0	36,2	37,5	36,3	**36,67**
60,0	**36,0**	**37,2**	**36,1**	**36,43**

Tab. 11

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Perlit				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,9	58,9	58,8	**58,87**
4,0	57,5	58,0	57,7	**57,73**
6,0	56,8	57,1	56,8	**56,90**
8,0	55,6	55,8	55,6	**55,67**
10,0	54,8	54,9	54,8	**54,83**
12,0	54,0	54,2	53,9	**54,03**
14,0	52,6	53,5	53,3	**53,13**
16,0	51,9	52,6	52,5	**52,33**
18,0	51,1	51,9	51,7	**51,57**
20,0	50,8	51,2	50,7	**50,90**
22,0	50,0	50,0	49,7	**49,90**
24,0	49,4	49,4	48,9	**49,23**
26,0	48,8	48,7	48,3	**48,60**
28,0	47,9	48,1	47,8	**47,93**
30,0	47,5	47,6	47,1	**47,40**
32,0	47,0	46,8	46,5	**46,77**
34,0	46,6	46,3	45,7	**46,20**
36,0	45,9	45,7	45,1	**45,57**
38,0	45,3	45,2	44,6	**45,03**
40,0	44,8	44,6	44,1	**44,50**
42,0	44,3	44,1	43,5	**43,97**
44,0	43,6	43,6	43,0	**43,40**
46,0	43,1	43,2	42,6	**42,97**
48,0	42,7	42,8	42,1	**42,53**
50,0	42,3	42,3	41,7	**42,10**
52,0	41,8	41,9	41,3	**41,67**
54,0	41,3	41,4	40,9	**41,20**
56,0	40,7	41,0	40,4	**40,70**
58,0	40,4	40,6	39,9	**40,30**
60,0	**39,3**	**40,1**	**39,5**	**39,63**

Tab. 12

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Fichtennadeln				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	57,6	58,3	59,0	**58,30**
4,0	55,8	57,0	57,8	**56,87**
6,0	54,8	55,6	56,8	**55,73**
8,0	53,8	54,7	55,4	**54,63**
10,0	52,9	53,9	54,4	**53,73**
12,0	52,1	53,3	53,5	**52,97**
14,0	51,3	52,4	52,9	**52,20**
16,0	50,2	51,7	52,1	**51,33**
18,0	49,3	50,9	51,3	**50,50**
20,0	48,7	49,7	50,1	**49,50**
22,0	47,9	49,0	49,3	**48,73**
24,0	47,3	48,3	48,5	**48,03**
26,0	46,6	47,6	47,8	**47,33**
28,0	46,1	46,9	47,1	**46,70**
30,0	45,6	46,3	46,4	**46,10**
32,0	45,1	45,7	45,8	**45,53**
34,0	44,6	45,1	45,1	**44,93**
36,0	44,1	44,6	44,6	**44,43**
38,0	43,6	44,0	43,9	**43,83**
40,0	43,1	43,5	43,4	**43,33**
42,0	42,6	42,9	42,9	**42,80**
44,0	42,1	42,4	42,3	**42,27**
46,0	41,6	41,9	41,7	**41,73**
48,0	41,1	41,5	41,5	**41,37**
50,0	40,7	41,0	40,8	**40,83**
52,0	40,3	40,6	40,3	**40,40**
54,0	39,5	40,1	39,8	**39,80**
56,0	39,4	39,8	39,3	**39,50**
58,0	39,1	39,3	38,9	**39,10**
60,0	**38,8**	**38,9**	**38,6**	**38,77**

Tab. 13

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Humus				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	57,6	58,0	57,7	**57,77**
4,0	55,4	55,8	55,6	**55,60**
6,0	53,9	54,4	54,0	**54,10**
8,0	52,6	53,1	52,7	**52,80**
10,0	51,4	52,0	51,5	**51,63**
12,0	49,8	51,1	49,9	**50,27**
14,0	48,7	49,6	48,9	**49,07**
16,0	47,8	48,7	48,1	**48,20**
18,0	46,8	47,8	47,2	**47,27**
20,0	46,0	46,9	46,4	**46,43**
22,0	45,2	46,1	45,6	**45,63**
24,0	44,4	45,4	44,8	**44,87**
26,0	43,8	44,7	44,1	**44,20**
28,0	43,0	44,0	43,4	**43,47**
30,0	42,4	43,4	42,7	**42,83**
32,0	41,7	42,7	42,1	**42,17**
34,0	41,0	41,9	41,4	**41,43**
36,0	40,3	41,3	40,6	**40,73**
38,0	39,8	40,8	40,1	**40,23**
40,0	39,3	40,3	39,6	**39,73**
42,0	38,8	39,8	39,1	**39,23**
44,0	38,3	39,3	38,6	**38,73**
46,0	37,8	38,8	38,1	**38,23**
48,0	37,3	38,3	37,6	**37,73**
50,0	36,5	37,8	37,1	**37,13**
52,0	36,4	37,4	36,7	**36,83**
54,0	36,0	37,0	36,3	**36,43**
56,0	35,6	36,6	35,9	**36,03**
58,0	35,3	36,1	35,5	**35,63**
60,0	**34,8**	**35,7**	**35,1**	**35,20**

Tab. 14

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Sand				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	57,5	59,1	58,7	**58,43**
4,0	55,4	58,3	57,2	**56,97**
6,0	53,9	56,6	55,3	**55,27**
8,0	52,7	54,9	54,1	**53,90**
10,0	51,5	53,8	53,0	**52,77**
12,0	49,9	52,7	52,0	**51,53**
14,0	48,9	50,5	51,1	**50,17**
16,0	48,0	49,4	49,8	**49,07**
18,0	47,1	48,6	48,9	**48,20**
20,0	46,3	47,7	48,2	**47,40**
22,0	45,5	47,0	47,4	**46,63**
24,0	44,8	46,3	46,6	**45,90**
26,0	44,1	45,6	45,9	**45,20**
28,0	43,4	44,9	45,3	**44,53**
30,0	42,8	44,3	44,6	**43,90**
32,0	42,1	43,7	43,9	**43,23**
34,0	41,5	43,1	43,3	**42,63**
36,0	40,9	42,6	42,8	**42,10**
38,0	40,3	42,1	42,3	**41,57**
40,0	39,8	41,5	41,7	**41,00**
42,0	39,3	41,0	40,8	**40,37**
44,0	38,8	40,6	40,2	**39,87**
46,0	38,3	40,1	39,9	**39,43**
48,0	37,9	39,6	39,4	**38,97**
50,0	37,4	39,2	38,9	**38,50**
52,0	37,0	38,8	38,5	**38,10**
54,0	36,6	38,3	38,1	**37,67**
56,0	36,1	37,9	37,6	**37,20**
58,0	35,8	37,4	37,1	**36,77**
60,0	**35,5**	**37,1**	**36,8**	**36,47**

Tab. 15

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Kokosnussfaser				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,9	58,8	59,1	**58,93**
4,0	57,9	57,8	58,2	**57,97**
6,0	56,6	56,5	57,4	**56,83**
8,0	55,3	55,3	55,8	**55,47**
10,0	54,4	54,4	55,1	**54,63**
12,0	53,6	53,1	54,3	**53,67**
14,0	52,5	52,7	53,4	**52,87**
16,0	51,0	51,9	52,6	**51,83**
18,0	49,9	51,1	51,9	**50,97**
20,0	49,9	49,9	51,3	**50,37**
22,0	48,3	49,2	50,2	**49,23**
24,0	47,4	48,6	49,4	**48,47**
26,0	46,8	48,0	48,8	**47,87**
28,0	46,1	47,2	48,1	**47,13**
30,0	45,4	46,6	47,5	**46,50**
32,0	44,9	46,1	46,9	**45,97**
34,0	44,4	45,5	46,3	**45,40**
36,0	43,8	44,9	45,8	**44,83**
38,0	43,3	44,3	45,1	**44,23**
40,0	42,8	43,8	44,7	**43,77**
42,0	42,3	43,4	44,1	**43,27**
44,0	41,8	42,9	43,6	**42,77**
46,0	41,3	42,4	43,1	**42,27**
48,0	40,8	42,0	42,6	**41,80**
50,0	40,4	41,6	42,1	**41,37**
52,0	40,0	41,1	41,6	**40,90**
54,0	39,7	40,8	41,2	**40,55**
56,0	39,1	40,4	40,8	**40,10**
58,0	38,6	39,8	40,3	**39,57**
60,0	**35,2**	**39,4**	**39,9**	**38,17**

Tab. 16

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Schafwolle				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,6	59,1	58,9	**58,87**
4,0	57,4	58,1	58,1	**57,87**
6,0	55,8	57,2	57,3	**56,77**
8,0	54,6	55,8	55,8	**55,40**
10,0	54,1	55,1	54,9	**54,70**
12,0	53,3	54,3	54,1	**53,90**
14,0	52,6	53,5	53,3	**53,13**
16,0	51,8	52,7	52,6	**52,37**
18,0	51,1	51,9	51,7	**51,57**
20,0	50,0	51,3	51,0	**50,77**
22,0	49,4	50,1	49,6	**49,70**
24,0	48,7	49,3	48,9	**48,97**
26,0	48,1	48,7	48,4	**48,40**
28,0	47,4	48,0	47,8	**47,73**
30,0	46,9	47,4	47,2	**47,17**
32,0	46,3	46,9	46,6	**46,60**
34,0	45,8	46,3	46,1	**46,07**
36,0	45,2	45,7	45,4	**45,43**
38,0	44,7	45,4	44,9	**45,00**
40,0	44,2	44,6	44,4	**44,40**
42,0	43,7	44,1	43,9	**43,90**
44,0	43,1	43,6	43,4	**43,37**
46,0	42,7	43,1	42,9	**42,90**
48,0	42,2	42,6	42,4	**42,40**
50,0	41,8	42,1	41,9	**41,93**
52,0	41,4	41,8	41,5	**41,57**
54,0	41,0	41,3	41,1	**41,13**
56,0	40,6	40,9	40,7	**40,73**
58,0	40,1	40,4	40,6	**40,37**
60,0	**39,7**	**40,0**	**40,1**	**39,93**

Tab. 17

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Sägemehl				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,9	59,0	58,7	**58,87**
4,0	57,9	58,0	57,7	**57,87**
6,0	56,8	57,2	56,4	**56,80**
8,0	55,5	55,6	55,3	**55,47**
10,0	54,4	54,8	54,3	**54,50**
12,0	53,6	53,9	53,6	**53,70**
14,0	52,7	53,1	52,8	**52,87**
16,0	51,8	52,3	51,9	**52,00**
18,0	50,8	51,5	51,2	**51,17**
20,0	49,6	50,5	50,0	**50,03**
22,0	48,8	49,5	49,3	**49,20**
24,0	48,0	48,9	48,6	**48,50**
26,0	47,3	48,1	47,9	**47,77**
28,0	46,7	47,4	47,3	**47,13**
30,0	45,9	46,9	46,3	**46,37**
32,0	45,4	46,3	45,9	**45,87**
34,0	44,8	45,6	45,4	**45,27**
36,0	44,1	45,1	44,8	**44,67**
38,0	43,6	44,6	44,3	**44,17**
40,0	43,0	44,1	43,8	**43,63**
42,0	42,5	43,5	43,2	**43,07**
44,0	42,0	43,0	42,7	**42,57**
46,0	41,4	42,5	42,2	**42,03**
48,0	40,9	42,1	41,7	**41,57**
50,0	40,5	41,5	41,3	**41,10**
52,0	40,0	41,1	40,7	**40,60**
54,0	39,6	40,6	40,2	**40,13**
56,0	39,1	40,3	39,8	**39,73**
58,0	38,7	39,8	39,4	**39,30**
60,0	**39,2**	**39,4**	**38,9**	**39,17**

Tab. 18

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Moos				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,0	59,1	59,0	**59,03**
4,0	58,0	58,1	57,9	**58,00**
6,0	57,0	57,3	57,1	**57,13**
8,0	55,7	55,9	55,8	**55,80**
10,0	54,9	55,1	54,9	**54,97**
12,0	54,0	54,3	54,1	**54,13**
14,0	53,2	53,6	53,4	**53,40**
16,0	52,4	52,8	52,6	**52,60**
18,0	51,6	52,1	51,9	**51,87**
20,0	50,7	51,3	51,1	**51,03**
22,0	49,5	50,4	50,0	**49,97**
24,0	48,8	49,4	49,3	**49,17**
26,0	48,1	48,8	48,6	**48,50**
28,0	47,4	48,2	48,0	**47,87**
30,0	46,7	47,5	47,3	**47,17**
32,0	46,0	46,9	46,8	**46,57**
34,0	45,3	46,3	46,1	**45,90**
36,0	44,8	45,8	45,6	**45,40**
38,0	44,2	45,3	45,0	**44,83**
40,0	43,7	44,8	44,4	**44,30**
42,0	43,2	44,1	43,9	**43,73**
44,0	42,6	43,6	43,4	**43,20**
46,0	42,1	43,1	42,9	**42,70**
48,0	41,6	42,6	42,3	**42,17**
50,0	41,4	42,2	41,9	**41,83**
52,0	41,0	41,7	41,1	**41,27**
54,0	40,6	41,3	40,8	**40,90**
56,0	40,2	40,9	40,2	**40,43**
58,0	39,5	40,4	39,8	**39,90**
60,0	**39,3**	**40,2**	**39,5**	**39,67**

Tab. 19

Messreihe zur Bestimmung des U-Werts: Stroh				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,0	59,1	58,7	**58,93**
4,0	58,0	58,1	57,7	**57,93**
6,0	57,1	57,1	56,7	**56,97**
8,0	55,7	55,7	55,7	**55,70**
10,0	54,8	54,8	54,6	**54,73**
12,0	54,0	53,9	53,7	**53,87**
14,0	53,2	53,2	52,9	**53,10**
16,0	52,4	52,4	52,1	**52,30**
18,0	51,6	51,6	51,5	**51,57**
20,0	50,8	50,9	50,8	**50,83**
22,0	49,6	49,7	49,7	**49,67**
24,0	48,9	48,9	49,0	**48,93**
26,0	48,2	48,3	48,4	**48,30**
28,0	47,6	47,6	47,6	**47,60**
30,0	46,9	46,9	46,9	**46,90**
32,0	46,3	46,4	46,4	**46,37**
34,0	45,7	45,8	45,8	**45,77**
36,0	45,1	45,2	45,2	**45,17**
38,0	44,5	44,6	44,6	**44,57**
40,0	43,9	44,0	44,0	**43,97**
42,0	43,4	43,5	43,4	**43,43**
44,0	42,9	43,0	42,9	**42,93**
46,0	42,4	42,5	42,4	**42,43**
48,0	42,0	42,0	41,9	**41,97**
50,0	41,5	41,6	41,5	**41,53**
52,0	41,1	41,1	41,1	**41,10**
54,0	40,6	40,7	40,6	**40,63**
56,0	40,3	40,3	40,1	**40,23**
58,0	39,8	39,8	39,7	**39,77**
60,0	**39,4**	**39,4**	**39,3**	**39,37**

Tab. 20

Tabellen zu Kapitel 5.4:

Versuche mit unterschiedlichem Wasseranteil: 33% Massenanteil				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	58,4	58,5	58,7	**58,53**
4,0	57,2	57,3	57,4	**57,30**
6,0	55,5	55,6	55,7	**55,60**
8,0	54,4	54,6	54,6	**54,53**
10,0	53,4	53,6	53,6	**53,53**
12,0	52,3	52,5	52,7	**52,50**
14,0	51,4	51,6	51,8	**51,60**
16,0	49,8	50,6	50,9	**50,43**
18,0	49,0	49,4	49,6	**49,33**
20,0	48,1	48,6	48,8	**48,50**
22,0	47,2	47,9	47,9	**47,67**
24,0	46,5	47,4	47,2	**47,03**
26,0	45,8	46,4	46,5	**46,23**
28,0	45,1	45,8	45,8	**45,57**
30,0	44,5	45,1	45,1	**44,90**
32,0	43,9	44,4	44,4	**44,23**
34,0	43,2	43,8	43,8	**43,60**
36,0	42,7	43,3	43,2	**43,07**
38,0	42,1	42,7	42,6	**42,47**
40,0	41,6	42,1	42,0	**41,90**
42,0	41,1	41,4	41,4	**41,30**
44,0	40,4	41,0	40,9	**40,77**
46,0	40,0	40,5	40,3	**40,27**
48,0	39,5	40,0	39,8	**39,77**
50,0	39,1	39,4	39,3	**39,27**
52,0	38,6	39,1	38,8	**38,83**
54,0	38,1	38,6	38,4	**38,37**
56,0	37,8	38,2	37,9	**37,97**
58,0	37,3	37,8	37,4	**37,50**
60,0	**36,9**	**37,3**	**37,1**	**37,10**

Tab. 21

Versuche mit unterschiedlichem Wasseranteil: 50% Massenanteil				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	57,0	57,4	57,9	**57,43**
4,0	54,3	55,8	55,4	**55,17**
6,0	52,6	54,3	53,8	**53,57**
8,0	51,3	53,1	52,8	**52,40**
10,0	49,6	51,8	51,4	**50,93**
12,0	48,4	50,5	49,8	**49,57**
14,0	47,4	49,4	48,8	**48,53**
16,0	46,5	48,4	47,8	**47,57**
18,0	45,6	47,5	47,0	**46,70**
20,0	44,7	46,6	46,2	**45,83**
22,0	43,9	45,8	45,4	**45,03**
24,0	43,2	45,8	44,6	**44,53**
26,0	42,4	44,3	43,8	**43,50**
28,0	41,7	43,6	43,1	**42,80**
30,0	41,0	42,9	42,5	**42,13**
32,0	40,4	42,3	41,8	**41,50**
34,0	39,8	41,6	41,1	**40,83**
36,0	39,1	41,0	40,5	**40,20**
38,0	38,5	40,4	39,9	**39,60**
40,0	37,9	39,8	39,4	**39,03**
42,0	37,4	39,3	38,8	**38,50**
44,0	36,9	38,7	38,3	**37,97**
46,0	36,4	38,2	37,8	**37,47**
48,0	35,9	37,7	37,3	**36,97**
50,0	35,4	37,2	36,8	**36,47**
52,0	34,9	36,8	36,3	**36,00**
54,0	34,6	36,3	35,9	**35,60**
56,0	34,2	35,9	35,5	**35,20**
58,0	33,8	35,4	34,9	**34,70**
60,0	**33,4**	**35,0**	**34,6**	**34,33**

Tab. 22

Versuche mit unterschiedlichem Wasseranteil: 60% Massenanteil				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	57,5	57,9	57,3	**56,57**
4,0	55,2	55,8	54,9	**54,30**
6,0	53,6	54,4	53,3	**52,77**
8,0	52,4	53,2	52,0	**51,53**
10,0	51,1	52,1	50,8	**50,33**
12,0	49,6	51,0	49,4	**49,00**
14,0	48,6	49,6	48,4	**47,87**
16,0	47,6	48,6	47,5	**46,90**
18,0	46,8	47,8	46,7	**46,10**
20,0	45,9	46,9	45,9	**45,23**
22,0	45,1	46,2	45,1	**44,47**
24,0	44,3	45,4	44,4	**43,70**
26,0	43,6	44,6	43,7	**42,97**
28,0	42,9	43,9	43,0	**42,27**
30,0	42,2	43,3	42,3	**41,60**
32,0	41,5	42,6	41,6	**40,90**
34,0	40,9	42,0	41,1	**40,33**
36,0	40,3	41,4	40,5	**39,73**
38,0	39,7	40,8	40,0	**39,17**
40,0	39,1	40,3	39,4	**38,60**
42,0	38,6	39,7	38,9	**38,07**
44,0	38,1	39,2	38,4	**37,57**
46,0	37,6	38,7	37,9	**37,07**
48,0	37,1	38,2	37,4	**36,57**
50,0	36,6	37,7	36,9	**36,07**
52,0	36,2	37,3	36,5	**35,67**
54,0	35,8	36,8	36,2	**35,27**
56,0	35,3	36,4	35,6	**34,77**
58,0	34,9	36,0	35,3	**34,40**
60,0	**34,6**	**35,5**	**34,9**	**34,00**

Tab. 23

Versuche mit unterschiedlichem Wasseranteil: 66% Massenanteil				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60	60	60	**60,00**
2,0	57,0	57,8	57,0	**56,77**
4,0	54,4	55,4	54,4	**54,23**
6,0	52,9	53,8	52,9	**52,70**
8,0	51,6	52,4	51,6	**51,37**
10,0	49,8	51,3	49,9	**49,83**
12,0	48,6	49,6	48,7	**48,47**
14,0	47,6	48,5	47,7	**47,43**
16,0	46,7	47,4	46,7	**46,43**
18,0	45,8	46,7	45,8	**45,60**
20,0	45,1	45,8	45,1	**44,83**
22,0	44,0	44,9	44,3	**43,90**
24,0	43,3	44,3	43,5	**43,20**
26,0	42,8	43,6	42,8	**42,57**
28,0	41,9	42,9	42,1	**41,80**
30,0	41,3	42,3	41,4	**41,17**
32,0	40,6	41,6	40,8	**40,50**
34,0	40,0	41,1	40,2	**39,93**
36,0	39,6	40,4	39,6	**39,37**
38,0	38,9	39,8	39,1	**38,77**
40,0	38,3	39,3	38,5	**38,20**
42,0	37,9	38,8	37,9	**37,70**
44,0	37,3	38,3	37,5	**37,20**
46,0	36,8	37,8	37,0	**36,70**
48,0	36,4	37,3	36,4	**36,20**
50,0	35,9	36,8	36,1	**35,77**
52,0	35,5	35,3	35,6	**34,97**
54,0	34,9	34,8	35,1	**34,43**
56,0	34,6	35,5	34,8	**34,47**
58,0	34,1	35,1	34,3	**34,00**
60,0	**33,8**	**34,7**	**33,9**	**33,63**

Tab. 24

Tabellen zu Kapitel 7.1:

Versuche mit unterschiedlichen Laubarten: Ohne Dämmung				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,0	58,9	58,8	**58,90**
4,0	58,1	57,6	57,7	**57,80**
6,0	57,0	56,7	56,7	**56,80**
8,0	56,1	55,6	55,8	**55,83**
10,0	55,1	54,5	54,8	**54,80**
12,0	54,2	53,5	53,8	**53,83**
14,0	53,2	52,5	53,0	**52,90**
16,0	52,4	51,6	52,2	**52,07**
18,0	51,5	50,7	51,4	**51,20**
20,0	50,6	50,0	50,6	**50,40**
22,0	50,0	49,1	50,0	**49,70**
24,0	49,1	48,3	49,2	**48,87**
26,0	48,3	47,5	48,4	**48,07**
28,0	47,5	46,8	47,6	**47,30**
30,0	46,8	46,1	47,0	**46,63**
32,0	46,1	45,4	46,1	**45,87**
34,0	45,4	44,8	45,7	**45,30**
36,0	44,8	44,1	45,1	**44,67**
38,0	44,2	43,5	44,5	**44,07**
40,0	43,5	42,9	44,0	**43,47**
42,0	42,9	42,3	43,5	**42,90**
44,0	42,4	41,9	42,9	**42,40**
46,0	41,9	41,3	42,4	**41,87**
48,0	41,4	40,9	41,8	**41,37**
50,0	40,9	40,3	41,4	**40,87**
52,0	40,5	39,9	40,9	**40,43**
54,0	40,0	39,4	40,5	**39,97**
56,0	39,6	38,9	40,1	**39,53**
58,0	39,1	38,5	39,5	**39,03**
60,0	**38,7**	**38,2**	**39,1**	**38,67**

Tab. 25

Versuche mit unterschiedlichen Laubarten: Styrodur				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,4	59,1	59,2	**59,23**
4,0	58,7	58,2	58,5	**58,47**
6,0	57,9	57,5	57,7	**57,70**
8,0	57,1	56,7	56,7	**56,83**
10,0	56,2	56,0	56,2	**56,13**
12,0	55,5	55,3	55,5	**55,43**
14,0	54,7	54,4	54,9	**54,67**
16,0	53,9	53,9	54,2	**54,00**
18,0	53,2	53,2	53,6	**53,33**
20,0	52,6	52,5	52,8	**52,63**
22,0	51,9	51,9	52,3	**52,03**
24,0	51,3	51,3	51,6	**51,40**
26,0	50,7	50,6	51,1	**50,80**
28,0	50,1	50,2	50,6	**50,30**
30,0	49,5	49,4	50,1	**49,67**
32,0	48,8	48,9	49,5	**49,07**
34,0	48,5	48,4	48,9	**48,60**
36,0	47,9	47,8	48,3	**48,00**
38,0	47,1	47,2	47,8	**47,37**
40,0	46,5	46,7	47,3	**46,83**
42,0	46,0	46,2	46,8	**46,33**
44,0	45,5	45,7	46,2	**45,80**
46,0	45,0	45,2	45,7	**45,30**
48,0	44,5	44,8	45,2	**44,83**
50,0	44,0	44,3	44,7	**44,33**
52,0	43,5	43,8	44,2	**43,83**
54,0	43,1	43,3	43,7	**43,37**
56,0	42,7	42,8	43,4	**42,97**
58,0	42,2	42,4	43,0	**42,53**
60,0	**41,8**	**42,0**	**42,6**	**42,13**

Tab. 26

Versuche mit unterschiedlichen Laubarten: Weide				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,4	59,1	59,4	**59,30**
4,0	58,7	58,2	58,6	**58,50**
6,0	58,2	57,5	57,8	**57,83**
8,0	57,8	56,7	57,0	**57,17**
10,0	57,0	56,0	56,2	**56,40**
12,0	56,5	55,3	55,5	**55,77**
14,0	55,8	54,6	54,7	**55,03**
16,0	55,0	54,0	54,0	**54,33**
18,0	54,3	53,3	53,3	**53,63**
20,0	53,6	52,6	52,6	**52,93**
22,0	52,9	52,0	51,9	**52,27**
24,0	52,2	51,4	51,3	**51,63**
26,0	51,6	50,8	50,8	**51,07**
28,0	51,0	50,3	50,2	**50,50**
30,0	50,4	49,7	49,6	**49,90**
32,0	49,8	49,0	49,0	**49,27**
34,0	49,1	48,4	48,4	**48,63**
36,0	48,5	47,8	47,8	**48,03**
38,0	47,9	47,3	47,2	**47,47**
40,0	47,3	46,7	46,7	**46,90**
42,0	46,7	46,2	46,2	**46,37**
44,0	46,2	45,7	45,6	**45,83**
46,0	45,7	45,3	45,2	**45,40**
48,0	45,2	44,8	44,7	**44,90**
50,0	44,7	44,3	44,2	**44,40**
52,0	44,2	43,8	43,7	**43,90**
54,0	43,8	43,4	43,3	**43,50**
56,0	43,3	43,0	42,9	**43,07**
58,0	42,8	42,6	42,4	**42,60**
60,0	**42,4**	**42,2**	**42,0**	**42,20**

Tab. 27

Versuche mit unterschiedlichen Laubarten: Trompetenbaum				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,2	59,2	59,3	**59,23**
4,0	58,2	58,4	58,0	**58,20**
6,0	57,4	57,5	57,8	**57,57**
8,0	56,7	56,7	57,1	**56,83**
10,0	55,9	55,9	56,3	**56,03**
12,0	55,2	55,2	55,6	**55,33**
14,0	54,4	54,4	54,9	**54,57**
16,0	53,7	53,7	54,2	**53,87**
18,0	52,9	53,0	53,5	**53,13**
20,0	52,3	52,3	52,9	**52,50**
22,0	51,7	51,6	52,3	**51,87**
24,0	51,1	51,0	51,6	**51,23**
26,0	50,5	50,4	51,0	**50,63**
28,0	49,9	49,8	50,5	**50,07**
30,0	49,3	49,1	49,9	**49,43**
32,0	48,6	48,4	49,3	**48,77**
34,0	48,0	47,9	48,7	**48,20**
36,0	47,4	47,4	48,1	**47,63**
38,0	46,9	46,7	47,5	**47,03**
40,0	46,3	46,2	47,0	**46,50**
42,0	45,8	45,6	46,5	**45,97**
44,0	45,3	45,1	46,0	**45,47**
46,0	44,8	44,6	45,5	**44,97**
48,0	44,3	44,1	44,9	**44,43**
50,0	43,8	43,6	44,5	**43,97**
52,0	43,4	43,2	44,1	**43,57**
54,0	42,9	42,8	43,7	**43,13**
56,0	42,4	42,3	43,3	**42,67**
58,0	42,1	41,8	42,8	**42,23**
60,0	**41,7**	**41,5**	**42,4**	**41,87**

Tab. 28

Versuche mit unterschiedlichen Laubarten: Apfelbaum				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,1	59,5	58,7	**59,10**
4,0	58,2	58,7	58,1	**58,33**
6,0	57,5	58,0	57,3	**57,60**
8,0	56,7	57,1	56,5	**56,77**
10,0	55,9	56,4	55,8	**56,03**
12,0	55,2	55,5	55,2	**55,30**
14,0	54,5	54,9	54,3	**54,57**
16,0	53,7	54,1	53,6	**53,80**
18,0	53,0	53,5	52,9	**53,13**
20,0	52,3	52,7	52,2	**52,40**
22,0	51,6	52,0	51,6	**51,73**
24,0	51,0	51,3	50,9	**51,07**
26,0	50,4	50,8	50,2	**50,47**
28,0	49,9	50,2	49,8	**49,97**
30,0	49,2	49,5	49,2	**49,30**
32,0	48,6	48,9	48,5	**48,67**
34,0	47,9	48,3	48,0	**48,07**
36,0	47,3	47,7	47,3	**47,43**
38,0	46,8	47,1	46,8	**46,90**
40,0	46,2	46,6	46,3	**46,37**
42,0	45,5	45,9	45,8	**45,73**
44,0	45,2	45,5	45,3	**45,33**
46,0	44,7	45,1	44,8	**44,87**
48,0	44,2	44,6	44,3	**44,37**
50,0	43,7	44,1	43,8	**43,87**
52,0	43,3	43,6	43,4	**43,43**
54,0	42,8	43,2	42,9	**42,97**
56,0	42,4	42,8	42,5	**42,57**
58,0	41,9	42,3	42,1	**42,10**
60,0	**41,5**	**41,9**	**41,7**	**41,70**

Tab. 29

Versuche mit unterschiedlichen Laubarten: Roteiche				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,2	59,2	59,0	**59,13**
4,0	58,3	58,3	58,2	**58,27**
6,0	57,4	57,5	57,4	**57,43**
8,0	56,7	56,6	56,6	**56,63**
10,0	55,9	55,8	55,8	**55,83**
12,0	55,1	55,2	55,1	**55,13**
14,0	54,3	54,4	54,4	**54,37**
16,0	53,4	53,7	53,7	**53,60**
18,0	52,8	53,0	53,0	**52,93**
20,0	52,1	52,3	52,3	**52,23**
22,0	51,5	51,7	51,7	**51,63**
24,0	50,8	51,0	51,0	**50,93**
26,0	50,2	50,4	50,5	**50,37**
28,0	49,6	49,8	49,9	**49,77**
30,0	48,9	49,2	49,3	**49,13**
32,0	48,3	48,6	48,6	**48,50**
34,0	47,7	47,9	48,0	**47,87**
36,0	47,1	47,4	47,5	**47,33**
38,0	46,5	46,8	46,9	**46,73**
40,0	46,0	46,3	46,4	**46,23**
42,0	45,4	45,8	45,9	**45,70**
44,0	44,9	45,3	45,4	**45,20**
46,0	44,4	44,8	44,9	**44,70**
48,0	43,9	44,3	44,4	**44,20**
50,0	43,4	43,8	44,0	**43,73**
52,0	43,0	43,3	43,5	**43,27**
54,0	42,5	42,8	43,1	**42,80**
56,0	42,1	42,4	42,6	**42,37**
58,0	41,7	42,0	42,3	**42,00**
60,0	**41,3**	**41,6**	**41,9**	**41,60**

Tab. 30

Versuche mit unterschiedlichen Laubarten: Magnolie				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,8	59,3	58,8	**59,30**
4,0	59,1	58,5	58,1	**58,57**
6,0	58,2	57,7	57,1	**57,67**
8,0	57,6	56,9	56,3	**56,93**
10,0	56,9	56,1	55,4	**56,13**
12,0	56,1	55,4	54,6	**55,37**
14,0	55,5	54,6	53,9	**54,67**
16,0	54,8	53,9	53,1	**53,93**
18,0	54,0	53,2	52,3	**53,17**
20,0	53,3	52,5	51,6	**52,47**
22,0	52,6	51,8	50,4	**51,60**
24,0	52,0	51,2	49,6	**50,93**
26,0	51,4	50,6	49,0	**50,33**
28,0	50,7	50,1	48,3	**49,70**
30,0	50,2	49,4	47,7	**49,10**
32,0	49,6	48,8	47,1	**48,50**
34,0	49,0	48,2	46,4	**47,87**
36,0	48,4	47,6	45,9	**47,30**
38,0	47,8	47,1	45,4	**46,77**
40,0	47,2	46,5	44,8	**46,17**
42,0	46,6	46,0	44,3	**45,63**
44,0	46,0	45,5	43,8	**45,10**
46,0	45,6	45,0	43,3	**44,63**
48,0	45,1	44,5	42,8	**44,13**
50,0	44,6	44,1	42,4	**43,70**
52,0	44,1	43,6	41,9	**43,20**
54,0	43,7	43,1	41,5	**42,77**
56,0	43,3	42,8	41,0	**42,37**
58,0	42,8	42,4	40,7	**41,97**
60,0	**42,4**	**41,9**	**40,3**	**41,53**

Tab. 31

Versuche mit unterschiedlichen Laubarten: Ahorn				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,1	59,1	59,0	**59,07**
4,0	58,2	58,2	58,1	**58,17**
6,0	57,2	57,4	57,2	**57,27**
8,0	56,3	56,5	56,3	**56,37**
10,0	55,4	55,8	55,5	**55,57**
12,0	54,7	55,1	54,7	**54,83**
14,0	53,9	54,4	53,9	**54,07**
16,0	53,2	53,7	53,2	**53,37**
18,0	52,5	52,9	52,5	**52,63**
20,0	51,8	52,3	51,8	**51,97**
22,0	51,2	51,7	51,1	**51,33**
24,0	50,6	51,0	50,5	**50,70**
26,0	50,0	50,4	49,9	**50,10**
28,0	49,4	49,9	49,2	**49,50**
30,0	48,7	49,1	48,6	**48,80**
32,0	48,1	48,5	47,9	**48,17**
34,0	47,5	47,9	47,3	**47,57**
36,0	47,0	47,4	46,7	**47,03**
38,0	46,4	46,7	46,2	**46,43**
40,0	45,3	46,2	45,7	**45,73**
42,0	45,1	45,7	45,1	**45,30**
44,0	44,9	45,2	44,6	**44,90**
46,0	44,3	44,8	44,1	**44,40**
48,0	43,8	44,1	43,6	**43,83**
50,0	43,4	43,8	43,2	**43,47**
52,0	42,9	43,3	42,7	**42,97**
54,0	42,5	42,8	42,3	**42,53**
56,0	42,0	42,4	41,8	**42,07**
58,0	41,6	42,0	41,4	**41,67**
60,0	**41,2**	**41,6**	**41,0**	**41,27**

Tab. 32

Versuche mit unterschiedlichen Laubarten: Buche				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,0	59,2	59,2	**59,13**
4,0	58,1	58,3	58,3	**58,23**
6,0	57,2	57,4	57,4	**57,33**
8,0	56,3	56,6	56,5	**56,47**
10,0	55,5	55,8	55,7	**55,67**
12,0	54,7	55,0	55,0	**54,90**
14,0	53,9	54,2	54,2	**54,10**
16,0	53,2	53,5	53,4	**53,37**
18,0	52,5	52,8	52,6	**52,63**
20,0	51,8	52,1	52,0	**51,97**
22,0	51,2	51,4	51,3	**51,30**
24,0	50,6	50,7	50,8	**50,70**
26,0	50,0	50,1	50,1	**50,07**
28,0	49,4	49,4	49,4	**49,40**
30,0	48,7	48,8	48,8	**48,77**
32,0	48,1	48,1	48,2	**48,13**
34,0	47,4	47,4	47,5	**47,43**
36,0	46,8	46,9	47,0	**46,90**
38,0	46,3	54,9	46,4	**49,20**
40,0	45,8	45,7	45,9	**45,80**
42,0	45,3	45,2	54,4	**48,30**
44,0	44,9	44,6	44,9	**44,80**
46,0	44,3	44,1	44,4	**44,27**
48,0	43,9	43,7	43,9	**43,83**
50,0	43,3	43,2	43,4	**43,30**
52,0	42,9	42,7	43,0	**42,87**
54,0	42,5	42,3	42,5	**42,43**
56,0	42,1	41,8	42,1	**42,00**
58,0	41,7	41,4	41,7	**41,60**
60,0	**41,1**	**41,0**	**41,3**	**41,13**

Tab. 33

Versuche mit unterschiedlichen Laubarten: Schafwolle				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2,0	59,0	59,1	59,4	**59,17**
4,0	58,2	58,2	58,6	**58,33**
6,0	57,5	57,4	57,8	**57,57**
8,0	56,7	56,6	57,0	**56,77**
10,0	55,9	55,9	56,2	**56,00**
12,0	55,2	55,1	55,6	**55,30**
14,0	54,5	54,4	54,9	**54,60**
16,0	53,8	53,7	54,1	**53,87**
18,0	53,2	53,0	53,4	**53,20**
20,0	52,5	52,3	52,8	**52,53**
22,0	51,9	51,6	52,1	**51,87**
24,0	51,3	51,1	51,5	**51,30**
26,0	50,7	50,4	50,8	**50,63**
28,0	49,2	49,8	50,4	**49,80**
30,0	49,7	49,1	49,8	**49,53**
32,0	49,0	48,4	48,7	**48,70**
34,0	48,5	47,8	48,6	**48,30**
36,0	47,9	47,2	48,0	**47,70**
38,0	47,4	46,5	47,5	**47,13**
40,0	46,9	45,9	46,8	**46,53**
42,0	46,4	45,3	46,4	**46,03**
44,0	45,9	45,0	45,9	**45,60**
46,0	45,4	44,3	45,4	**45,03**
48,0	45,1	43,9	44,5	**44,50**
50,0	44,6	43,4	44,2	**44,07**
52,0	44,2	43,0	44,0	**43,73**
54,0	43,9	42,6	43,5	**43,33**
56,0	43,3	42,2	43,2	**42,90**
58,0	42,9	41,9	42,8	**42,53**
60,0	**42,5**	**41,5**	**42,3**	**42,10**

Tab. 34

Tabellen zu Kapitel 7.2:

Messungen zur Schalldämmung: Ohne Dämmung				
Frequenz [Hz]	**Messung 1 [dB]**	**Messung 2 [dB]**	**Messung 3 [dB]**	**Durchschnitt [dB]**
20	30	30	30	**30,00**
40	64,3	63,9	63,2	**63,80**
60	79,4	79,2	80,9	**79,83**
80	95,5	95,3	94,9	**95,23**
100	95,2	95,2	95,2	**95,20**
120	95,7	95	94,8	**95,17**
140	96	96	95,9	**95,97**
160	94,7	94,9	94,3	**94,63**
180	93,8	93,7	94,8	**94,10**
200	94,8	94,6	94,6	**94,67**
250	98,2	98,3	97,8	**98,10**
300	100,3	100	98,8	**99,70**
350	99,8	97,9	97,8	**98,50**
400	102,7	102,7	102,7	**102,70**
450	102,9	102,9	102,9	**102,90**
500	100,5	100,5	100,5	**100,50**
600	99,7	99,7	99,7	**99,70**
700	100,2	99,7	99,8	**99,90**
800	92,8	92,7	92,6	**92,70**
900	88,8	89,2	97,9	**91,97**
1000	89,7	89,8	89,8	**89,77**

Tab. 35

Messungen zur Schalldämmung: Glaswolle				
Frequenz [Hz]	**Messung 1 [dB]**	**Messung 2 [dB]**	**Messung 3 [dB]**	**Durchschnitt [dB]**
20	30	30	30	**30,00**
40	65	65,4	67,4	**65,93**
60	81,1	81,1	81,4	**81,20**
80	92	92,2	91,4	**91,87**
100	93,4	93,4	93,5	**93,43**
120	94,6	95	94,6	**94,73**
140	96,3	95,1	96	**95,80**
160	95,4	95,6	95,6	**95,53**
180	94,5	94,9	95,3	**94,90**
200	96	96,2	96,2	**96,13**
250	98,3	99,3	99,4	**99,00**
300	101,3	101,3	99,9	**100,83**
350	100,2	99,4	100,2	**99,93**
400	102,3	102,7	102,3	**102,43**
450	102,5	102,9	102,5	**102,63**
500	100,1	99,2	99,5	**99,60**
600	98,2	98,5	96,6	**97,77**
700	96,8	97,2	97,2	**97,07**
800	88,6	88,6	89,9	**89,03**
900	83,8	93,7	83,6	**87,03**
1000	83,3	82,4	83,1	**82,93**

Tab. 36

Messungen zur Schalldämmung: Styrodur/Styropor				
Frequenz [Hz]	**Messung 1 [dB]**	**Messung 2 [dB]**	**Messung 3 [dB]**	**Durchschnitt [dB]**
20	30	30	30	**30,00**
40	67,3	66,8	67,7	**67,27**
60	81,4	80,9	91,8	**84,70**
80	91,3	91,4	90,8	**91,17**
100	90,7	96,6	90,8	**92,70**
120	95,4	94	93,7	**94,37**
140	94	96,1	96,1	**95,40**
160	95,2	95,2	95	**95,13**
180	93,8	93,9	93,9	**93,87**
200	95,6	95,5	95,5	**95,53**
250	99	98	99	**98,67**
300	100,7	100,9	100,1	**100,57**
350	99,2	94,4	99,4	**97,67**
400	102,9	102,9	102,9	**102,90**
450	100,2	95,9	102,9	**99,67**
500	96,8	96,7	96,7	**96,73**
600	97,6	97,9	97,8	**97,77**
700	91,8	91,9	91	**91,57**
800	90,7	91,3	90,7	**90,90**
900	91,7	91,9	91,1	**91,57**
1000	89	89,5	89,6	**89,37**

Tab. 37

Messungen zur Schalldämmung: Holzspäne				
Frequenz [Hz]	**Messung 1 [dB]**	**Messung 2 [dB]**	**Messung 3 [dB]**	**Durchschnitt [dB]**
20	30	30	30	**30,00**
40	65	64,5	64	**64,50**
60	79	79,7	80,8	**79,83**
80	91,4	91,2	92,6	**91,73**
100	92,8	92,8	92,8	**92,80**
120	94,2	94	94	**94,07**
140	94,8	94,1	94,8	**94,57**
160	94,7	94,6	94,7	**94,67**
180	93,5	93,5	93,6	**93,53**
200	96,5	96,1	96,1	**96,23**
250	97,6	99,6	99,6	**98,93**
300	101,8	101,5	101,1	**101,47**
350	100,8	99,9	100,8	**100,50**
400	102,3	101,4	102,7	**102,13**
450	102,9	98,8	100,9	**100,87**
500	100,9	100,1	100,3	**100,43**
600	100,9	99,7	99,8	**100,13**
700	97,8	97,5	97,5	**97,60**
800	91,3	93,2	90,8	**91,77**
900	88,7	89,7	88,7	**89,03**
1000	89	89	89	**89,00**

Tab. 38

Messungen zur Schalldämmung: Holz (Kiefer)				
Frequenz [Hz]	**Messung 1 [dB]**	**Messung 2 [dB]**	**Messung 3 [dB]**	**Durchschnitt [dB]**
20	30	30	30	**30,00**
40	58,7	57,8	58,1	**58,20**
60	60,4	68,2	72,4	**67,00**
80	80,8	80,4	80,4	**80,53**
100	83,3	83,3	83,1	**83,23**
120	84,9	84,9	84,9	**84,90**
140	86,9	84,3	85,7	**85,63**
160	81,9	81,7	81,8	**81,80**
180	82,7	83,9	86,9	**84,50**
200	85,1	85,1	85,1	**85,10**
250	90,7	89,4	90,7	**90,27**
300	89,8	89,7	88,8	**89,43**
350	88,8	89,2	86,2	**88,07**
400	85,3	85,3	84,5	**85,03**
450	89	88,2	89,1	**88,77**
500	84,5	85,8	84,5	**84,93**
600	80,9	81,9	80,6	**81,13**
700	86,7	77,4	77,4	**80,50**
800	80,5	80,9	80,5	**80,63**
900	89,4	79,4	79,4	**82,73**
1000	60,7	55,9	52,3	**56,30**

Tab. 39

Messungen zur Schalldämmung: Schafwolle				
Frequenz [Hz]	**Messung 1 [dB]**	**Messung 2 [dB]**	**Messung 3 [dB]**	**Durchschnitt [dB]**
20	30	30	30	**30,00**
40	65	64,4	64,5	**64,63**
60	78,3	78,3	78,6	**78,40**
80	93,8	93	93	**93,27**
100	85,2	95,1	95,1	**91,80**
120	96,2	96,8	96,9	**96,63**
140	98,8	91	97	**95,60**
160	95	95,9	95,7	**95,53**
180	94,7	95,5	94,8	**95,00**
200	96,3	96,6	96,5	**96,47**
250	96,3	97,7	97,7	**97,23**
300	101,4	100,9	101,6	**101,30**
350	101	100,3	100,1	**100,47**
400	101,7	102,9	100,8	**101,80**
450	101,3	103	103	**102,43**
500	102	102	102,8	**102,27**
600	100	98,9	99,1	**99,33**
700	99,3	99,7	99,3	**99,43**
800	90	90,2	91,2	**90,47**
900	86,6	86,4	86,6	**86,53**
1000	83,2	85,2	85,8	**84,73**

Tab. 40

Messungen zur Schalldämmung: Laub				
Frequenz [Hz]	**Messung 1 [dB]**	**Messung 2 [dB]**	**Messung 3 [dB]**	**Durchschnitt [dB]**
20	30	30	30	**30,00**
40	68	65,4	63,1	**65,50**
60	80	80,5	80,6	**80,37**
80	93,2	93,3	92,3	**92,93**
100	94	94	94	**94,00**
120	94,7	94,7	95,5	**94,97**
140	95,9	95,9	95,5	**95,77**
160	94,6	94,8	94,8	**94,73**
180	93,6	93,6	95,5	**94,23**
200	95,8	95,8	98,1	**96,57**
250	98,3	96,7	96,7	**97,23**
300	101,4	101,2	100,3	**100,97**
350	100,8	100,6	100,9	**100,77**
400	102,7	102,9	103	**102,87**
450	103	103	103	**103,00**
500	100,9	100,4	100,8	**100,70**
600	100,7	100,1	100,4	**100,40**
700	98,4	98,4	95,4	**97,40**
800	89,3	89,6	89,6	**89,50**
900	86,6	86,2	86,2	**86,33**
1000	86,3	87,2	87,3	**86,93**

Tab. 41

Messungen zur Schalldämmung: Laub/Holz				
Frequenz [Hz]	**Messung 1 [dB]**	**Messung 2 [dB]**	**Messung 3 [dB]**	**Durchschnitt [dB]**
20	30	30	30	**30,00**
40	58,8	59,3	59,4	**59,17**
60	68,7	71,2	70,1	**70,00**
80	79,3	78,8	78,4	**78,83**
100	83,4	83,5	83,5	**83,47**
120	81,8	81,7	81,4	**81,63**
140	87,8	87,6	87,5	**87,63**
160	85,4	85,1	84,9	**85,13**
180	86,8	85,9	85,9	**86,20**
200	87,3	86,4	87,2	**86,97**
250	90	90	89,9	**89,97**
300	91,7	92	92	**91,90**
350	87,8	87,8	87,1	**87,57**
400	88,4	88,9	92,6	**89,97**
450	88,5	86,5	86,5	**87,17**
500	82,3	82	82	**82,10**
600	81,4	80,1	80,1	**80,53**
700	77,4	73,4	73,9	**74,90**
800	78,4	78,5	78,5	**78,47**
900	73,5	76,7	77,2	**75,80**
1000	67,5	76,8	71,5	**71,93**

Tab. 42

Tabelle zu Kapitel 8.1:

Optimale Dämmung I				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2	59,6	59,5	59,2	**59,43**
4	59,0	58,8	58,4	**58,73**
6	58,2	58,1	58,0	**58,10**
8	57,5	57,4	57,4	**57,43**
10	56,8	56,6	56,6	**56,67**
12	56,1	56,0	55,9	**56,00**
14	55,5	55,3	55,3	**55,37**
16	54,8	54,6	54,7	**54,70**
18	54,1	54,0	54,1	**54,07**
20	53,5	53,3	53,5	**53,43**
22	52,8	52,7	52,7	**52,73**
24	52,2	52,1	52,1	**52,13**
26	51,6	51,5	51,5	**51,53**
28	51,1	50,9	51,0	**51,00**
30	50,5	50,3	50,5	**50,43**
32	50,0	49,8	50,0	**49,93**
34	49,4	49,2	49,3	**49,30**
36	48,8	48,5	48,7	**48,67**
38	48,2	48,0	48,1	**48,10**
40	47,7	47,4	47,5	**47,53**
42	47,2	46,9	46,9	**47,00**
44	46,7	46,4	46,5	**46,53**
46	46,2	45,9	46,0	**46,03**
48	45,7	45,4	45,5	**45,53**
50	45,2	45,0	45,1	**45,10**
52	44,8	44,5	44,6	**44,63**
54	44,3	44,0	44,2	**44,17**
56	43,9	43,6	43,7	**43,73**
58	43,5	43,1	43,4	**43,33**
60	**43,1**	**42,7**	**43,0**	**42,93**

Tab. 43

Tabelle zu Kapitel 10.:

Optimale Dämmung II				
t [min]	**Messung 1 [°C]**	**Messung 2 [°C]**	**Messung 3 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0	60,0	60,0	60,0	**60,00**
2	59,2	59,4	59,4	**59,33**
4	58,4	58,6	58,7	**58,57**
6	57,5	57,7	57,9	**57,70**
8	56,7	57,0	57,2	**56,97**
10	55,9	56,3	56,5	**56,23**
12	55,2	55,5	55,8	**55,50**
14	54,5	54,8	55,1	**54,80**
16	53,7	54,1	54,4	**54,07**
18	53,0	53,4	53,7	**53,37**
20	52,3	52,7	53,0	**52,67**
22	51,7	52,0	52,3	**52,00**
24	51,0	51,4	51,7	**51,37**
26	50,5	50,8	51,1	**50,80**
28	49,8	50,2	50,5	**50,17**
30	49,2	49,6	49,9	**49,57**
32	48,5	49,0	49,3	**48,93**
34	47,9	48,4	48,7	**48,33**
36	47,4	47,8	48,1	**47,77**
38	46,8	47,2	47,4	**47,13**
40	46,2	46,7	46,9	**46,60**
42	45,7	46,2	46,4	**46,10**
44	45,2	45,7	45,9	**45,60**
46	44,7	45,2	45,3	**45,07**
48	44,2	44,7	44,8	**44,57**
50	43,7	44,3	44,3	**44,10**
52	43,3	43,8	43,9	**43,67**
54	42,8	43,3	43,4	**43,17**
56	42,4	42,9	43,0	**42,77**
58	42,0	42,5	42,6	**42,37**
60	**41,6**	**42,1**	**42,2**	**41,97**

Tab. 44

Messungen im Modellhaus mit Laub									
Zeit [min]	**Thermometer 1 [°C]**	**Thermometer 2 [°C]**	**Thermometer 3 [°C]**	**Thermometer 4 [°C]**	**Thermometer 5 [°C]**	**Thermometer 6 [°C]**	**Thermometer 7 [°C]**	**Thermometer 8 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	54,2	64,4	58,9	57,3	61,9	57,7	58,1	58,0	**58,81**
5,0	36,8	41,6	41,2	38,5	37,9	40,9	37,7	40,1	**39,35**
10,0	31,1	35,0	34,8	32,0	31,4	34,9	31,8	33,8	**33,10**
15,0	28,7	31,2	30,9	29,1	28,9	31,2	29,2	30,7	**29,98**
20,0	27,3	29,2	28,9	27,5	27,5	29,1	27,6	28,7	**28,23**
25,0	26,3	27,9	27,6	26,5	26,6	27,8	26,6	27,3	**27,06**
30,0	25,6	26,8	26,6	25,7	25,9	26,8	25,8	26,4	**26,19**
35,0	25,0	26,2	25,8	25,0	25,2	26,0	25,2	25,6	**25,49**
40,0	24,5	25,5	25,0	24,5	24,7	25,3	24,6	25,0	**24,89**
45,0	24,0	25,0	24,6	24,1	24,3	24,8	24,1	24,5	**24,43**
50,0	23,7	24,6	24,2	23,8	23,9	24,1	23,6	24,0	**23,98**
55,0	23,3	24,1	23,7	23,4	23,6	23,7	23,2	23,6	**23,56**
60,0	23,0	23,8	23,4	23,0	23,3	23,4	22,9	23,2	**23,23**

Tab. 45

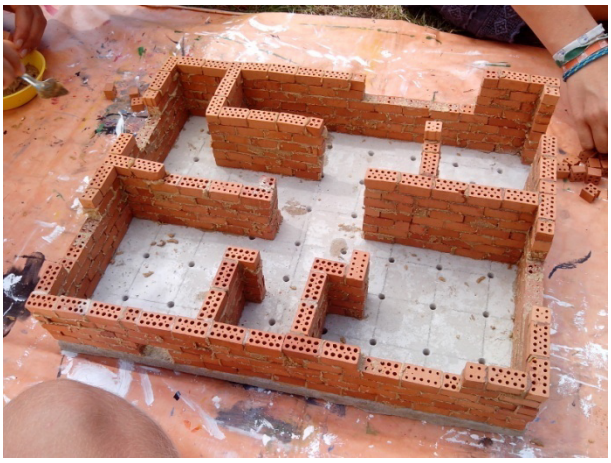
Messungen im Modellhaus mit Glaswolle									
Zeit [min]	**Thermometer 1 [°C]**	**Thermometer 2 [°C]**	**Thermometer 3 [°C]**	**Thermometer 4 [°C]**	**Thermometer 5 [°C]**	**Thermometer 6 [°C]**	**Thermometer 7 [°C]**	**Thermometer 8 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	51,5	58,9	59,2	57,6	60,1	62,7	57,6	62,6	**58,75**
5,0	35,2	40,4	42,3	30,6	39,3	41,3	37,8	41,1	**38,50**
10,0	30,4	31,0	31,3	31,4	32,7	31,5	32,3	34,5	**31,89**
15,0	28,3	30,8	31,2	28,8	29,5	31,1	29,7	31,1	**30,07**
20,0	27,2	28,9	29,4	27,3	27,8	29,1	28,1	29,1	**28,36**
25,0	25,9	27,5	27,6	26,3	26,8	27,7	26,9	27,6	**27,05**
30,0	25,2	26,5	27,9	25,5	26,0	26,6	26,1	26,5	**26,30**
35,0	24,7	25,7	25,7	24,9	25,4	25,8	25,4	25,7	**25,41**
40,0	24,1	24,9	25,0	24,3	25,1	25,2	24,8	25,1	**24,82**
45,0	23,8	24,6	24,4	23,9	24,4	24,7	24,3	24,4	**24,30**
50,0	23,4	24,1	24,0	23,7	23,9	24,2	23,8	23,9	**23,89**
55,0	23,0	23,7	23,6	23,1	23,6	23,8	23,4	23,5	**23,46**
60,0	22,6	23,4	23,3	22,6	23,2	23,5	23,0	23,1	**23,08**

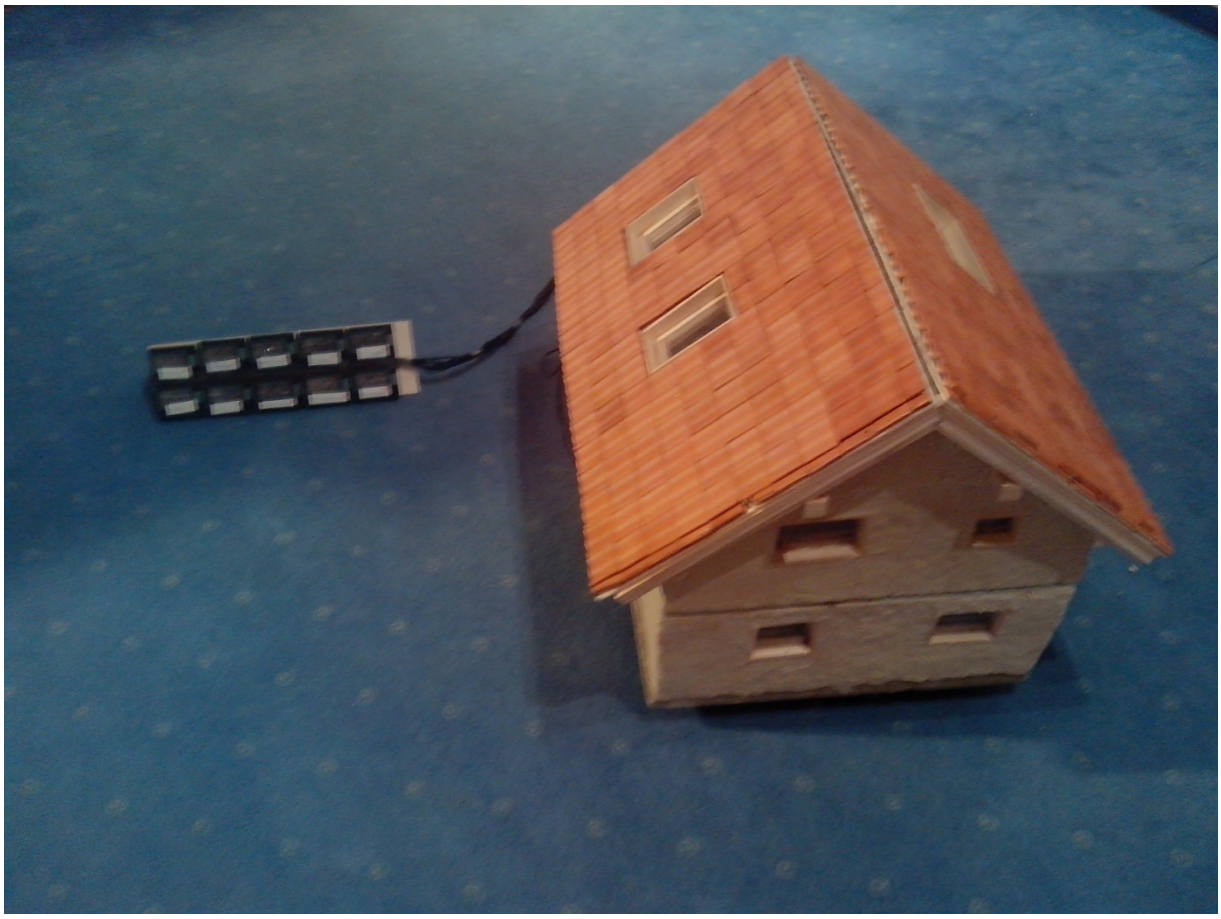
Tab. 46

	Messungen im Modellhaus mit Styropor								
Zeit [min]	**Thermometer 1 [°C]**	**Thermometer 2 [°C]**	**Thermometer 3 [°C]**	**Thermometer 4 [°C]**	**Thermometer 5 [°C]**	**Thermometer 6 [°C]**	**Thermometer 7 [°C]**	**Thermometer 8 [°C]**	**Durchschnitt [°C]**
0,0	55,9	59,3	60,9	56,6	60,6	59,9	59,5	59,4	**59,01**
5,0	34,4	40,2	40,8	34,0	38,1	40,3	39,4	40,3	**38,43**
10,0	32,1	34,2	34,4	31,8	32,3	34,4	33,3	34,0	**33,33**
15,0	29,1	30,5	30,6	28,9	29,2	30,7	30,0	30,5	**29,94**
20,0	27,6	28,6	28,5	27,3	27,8	28,6	28,3	26,8	**27,95**
25,0	27,5	27,5	27,4	26,5	26,9	27,5	27,2	27,3	**27,23**
30,0	25,7	26,4	26,1	25,7	25,9	26,5	26,2	26,3	**26,11**
35,0	25,1	25,7	25,6	25,0	25,4	25,8	25,5	25,6	**25,48**
40,0	24,7	25,2	25,2	24,6	24,8	25,2	24,9	25,0	**24,94**
45,0	24,2	24,7	26,3	24,2	24,4	24,7	24,4	24,5	**24,66**
50,0	23,8	24,2	24,2	23,8	24,0	24,3	23,9	24,0	**24,03**
55,0	23,5	23,9	23,8	23,4	23,7	24,0	23,6	23,5	**23,67**
60,0	23,2	23,6	23,5	22,9	23,3	23,7	23,3	23,3	**23,34**

Tab. 47

III. Bau des Modellhauses





IV. Forschungstagebuch

Sommer 2011: Energetische Sanierung unserer Schule und eines benachbarten Gebäudes

September 2011: Erste Ideen zu unserem Forschungsprojekt

Oktober/November 2011: Theoretische Beschäftigung mit der Problematik früherer und heutiger Dämmstoffe

Dezember 2011 – Februar 2012: Suche nach einem geeigneten Versuchsaufbau und möglichen Testmaterialien

März 2012: Bestellung von drei Aluminiumwürfel bei der Firma Haidenhein Traunreut

April – Oktober 2012: Erforschung aller Teststoffe auf ihre Dämmeigenschaft mit Hilfe des Versuchsaufbau aus Styrodur- und Aluminiumwürfel

November 2012: Auswertung der Messungen und Berechnung der U- und λ-Werte; anschließender Vergleich mit herkömmlichen Dämmmaterialien

Dezember 2012: Beurteilung der von uns getesteten Dämmmaterialien im Bezug auf ihre Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Anwendungsmöglichkeiten; Versuch zur Auswirkung von Feuchtigkeit auf Dämmmaterialien mit Sägemehl

Januar 2013: Zusammenfassung unserer Ergebnisse

März/April 2013: nach kurzer Forschungspause erste Ideen zur Optimierung von Laub und somit neue Zielsetzung

Mai - August 2013: Untersuchung von verschiedener Laubarten und Kombinationen mit leicht verändertem Versuchsaufbau, Auswertung der Ergebnisse und Berechnung der U- und λ-Werte

September 2013: Idee und Ausführung eines Versuchs zur Schalldämmung und Auswertung, aufgrund der Ergebnisse erste Idee zu einer optimalen Dämmung

Oktober/November 2013: Überlegungen zur Lösung der Nachteile von Laub mit Idee zur Integration einer Schafwollschicht in die Dämmung; Konzept zur praktischen Umsetzung einer Dach- und Fassadendämmung und einer in den Ziegelstein integrierte Dämmung, Überlegung, ein Modellhaus zur Veranschaulichung und weiterer Messungen zu bauen

Dezember 2013: Bau eines Modellhauses im Maßstab 1:20 eines durchschnittlichen Einfamilienhauses mit Einbau einer Innen- und Dachdämmung; Erstellen eines Versuchsaufbaus

Januar 2014: Durchführung einer Messreihe mit Styrodur, Glaswolle und Laub; Fotos mit einer Wärmebildkamera; Beginn mit der schriftlichen Arbeit

Februar/März 2014: Entwicklung eines Konzepts zur industriellen Umsetzung, Vollendung der schriftlichen Arbeit