Wissenschaftliche Arbeit im Fach Naturwissenschaft und Technik

Eberhard Karls Universität Tübingen

Entwicklung eines Laborversuchs zur Vermessung unterschiedlicher Wandaufbauten hinsichtlich ihres Wärmedurchgangs mit Hilfe einer Wärmebildkamera

Prof. Dr. Peter Grabmayr
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät
Physikalisches Institut

Betreuer: Prof. Dr. rer.nat. Martin Brunotte

Soraya Yasemin Beck
Mönchhütteweg 6
72070 Tübingen

Matrikelnummer: 3518052

Tel. 0152/08158695
sorayabeck@web.de

Lehramt an Gymnasien
Tübingen, 03.01.2015

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 1
1. Einleitung 4
2. Die Wärmebildkamera 7
2.1 Physikalische Grundlagen 7
2.1.1 Das elektromagnetische Spektrum 7
2.1.2 Strahlung des schwarzen Körpers 9
2.1.2.1 Plancksches Strahlungsgesetz 10
2.1.2.2 Stefan-Boltzmann-Gesetz 11
2.1.2.3 Wiensches Verschiebungsgesetz 11
2.1.3 Strahlungsgesetze realer Körper 12
2.1.3.1 Der Emissionsgrad 13
2.2 Historische Entwicklung der Thermografie 14
2.3 Messaufnahme mit der Wärmebildkamera 15
2.3.1 Voraussetzung für eine korrekte quantitative Messung 16
2.3.1.1 Atmosphäre 16
2.3.1.2 Umgebungstemperatur 17
2.3.1.3 Temperaturdifferenz 17
2.3.1.4 Fremdstrahlung 17
2.3.1.5 Weitere Einflüsse 18
2.3.2 Funktionsweise der Wärmebildkamera 18
2.3.2.1 Scanner- Thermografie 19
2.3.2.2 FPA -Thermografie 20
2.3.2.3 Thermische Detektoren 21
2.3.2.4 Quantendetektoren 22
2.4 Derzeitiger Einsatz der Wärmebildkamera und Laborversuche 23
3. Wärmedämmung 25
3.1 Grundlagen des Wärmetransports 25
3.1.1 Wärmeleitung 26
3.1.1.1 Stationäre Wärmeleitung 26
3.1.1.2 Instationäre Wärmeleitung 28
3.1.2 Wärmeströmung/Wärmekonvektion 29

3.1.3 Wärmestrahlung 31
3.2 Wärmedurchgangskoeffizient U von Dämmstoffen 32
3.3 Wärmeleitfähigkeit ʎ von Dämmstoffen 35
3.3.1 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen 36
3.4 Wärmebrücken 37
3.5 Aktuelle Standards, Richtlinien, DIN Normen 38
3.6 Untersuchung an bestehenden und unbekannten Wandaufbauten 39
4. Versuchsentwicklung 41
4.1 Das PHYWE Thermohaus 41
4.1.1 Aufbau und Funktionsweise des PHYWE Thermohauses 41
4.1.2 Messaufnahme mit der Wärmebildkamera am PHYWE Thermohaus 43
4.2 Versuchsaufbau des neues Thermohaus 47
4.2.1 Ziegelwand 49
4.2.1.1 Fenster 50
4.2.2 Betonwand 52
4.2.3 Holzwand 54
4.2.4 Der Holzrahmenbau 55
4.2.4.1 Dämmung mit Expandiertem Polystyrol 56
4.2.4.2 Dämmung mit Holzfaserdämmplatten 57
4.2.4.3 Hinterlüftete Fassade 58
4.2.5 Wasserheizung 60
4.3 Versuchsdurchführung 61
4.4 Versuchsauswertung 63
4.4.1 Überprüfung des stationären Zustands 63
4.4.2 Auswertung der einzelnen Wände 64
4.4.2.1 Theoretische Berechnungen zur Ziegelwand 64
4.4.2.2 Messergebnisse für die Ziegelwand 69
4.4.2.3 Messwerte der Ziegelwand mit EPS-Außendämmung 76
4.4.2.4 Messwerte für das Fenster 76
4.4.2.5 Theoretische Berechnungen zur Holzwand mit Holzfaserdämmung 77
4.4.2.6 Messergebnisse für die Holzwand mit Holzfaserdämmung: 79
4.4.2.7 Theoretische Berechnungen zur Holzwand gedämmt mit EPS 84
4.4.2.8 Messergebnisse für die Holzwand mit EPS-Dämmung: 86

4.4.2.9 Messwerte der Holzwand gedämmt mit EPS und Hinterlüftung 91
4.4.2.10 Theoretische Berechnungen zur Betonwand mit StarTherm 92
4.4.2.11 Messergebnisse für die Betonwand: 94
5. Zusammenfassung und Ausblick 99
6. Verzeichnisse 101
6.1 Abkürzungsverzeichnis 101
6.2 Abbildungsverzeichnis 102
6.3 Tabellenverzeichnis 104
7. Erklärung 109
8. Anhang 110
I. Vorläufige Versuchsanleitung 110
II. Internetquellen 110
III. Messdaten 110

1. Einleitung

Erschreckende Erkenntnisse bezüglich einer drohenden Klimakatastrophe verunsichern die Bevölkerung schon seit einigen Jahrzehnten:

„Die Temperaturzunahme der letzten 50 Jahre ist doppelt so hoch wie die der letzten 100 Jahre. Die Erwärmung der Arktis erfolgte mehr als doppelt so schnell“ und „Weltweit schrumpfen die Gletscher sowie die Eisschilde auf Grönland und der Antarktis“ (Quaschning 2008, S. 39).

Aber auch die wirtschaftlichen Aspekte, wie etwa das Aufbrauchen der fossilen Energieträger, bereiten Sorgen, „Denn einerseits steigt die Nachfrage, während das Angebot eher rückläufig ist, anderseits steigt der Aufwand für das Erschließen neuer Vorkommen und damit die Kosten stetig an“ (Quaschning 2008, S. 35 f.). Dabei ist „Die Hoffnung auf eine Trendumkehr […] vergebens“ (Hegner 2008, S. 13).

Eine Möglichkeit dagegen zu steuern und mit diesen Problemen, sowohl in wirtschaftlicher als auch in ökologischer Sicht gewinnbringend, umzugehen ist der Ausbau und die Weiterentwicklung der erneuerbaren Energien. Als auch der sinnvolle Umgang mit Energie, denn viel Energie wird unnötig verbraucht und deshalb verschwendet, obwohl ein solch hoher Energieverbrauch nicht nötig ist, um unseren derzeitigen Lebensstandard beizubehalten (vgl. Quaschning 2008, S. 61).

Einen entscheidenden Schlüssel zur Einsparung von Energie und dadurch zur Reduzierung der Umweltbelastung, stellt beispielsweise eine geeignete und sinnvolle Wärmedämmung dar (vgl. Zelger 2000, S. 3). Die Statistik der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) und des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (siehe Abbildung 1) zeigt, dass 29 % des gesamten Energieverbrauchs 2012 in Deutschland auf die Raumwärme entfiel

Abbildung 1: Statistik der AGEB und der BDEW zum Energieverbrauch in Deutschland 2012 (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2014).

(vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2014). Es wird außerdem deutlich, dass, vor allem auch für die privaten Haushalte, ein großes Potenzial zur Einsparung von Energie und damit zur Senkung der Energiekosten durch eine geeignete Wärmedämmung der Hauswände vorhanden wäre.

In der folgenden Arbeit wird deshalb ein Versuchsaufbau vorgestellt, welcher für Studenten und Studentinnen entwickelt wurde, in dem unterschiedliche Wandaufbauten auf ihre Wärmedämmung und ihren Wärmedurchgang untersucht werden können. Durch diesen Versuch soll zunächst die Qualität der unterschiedlichen Dämmmaterialien, die in unterschiedliche Wandaufbauten verwendet werden, festgestellt werden und weitergehend das Bewusstsein der Versuchsdurchführenden hinsichtlich der Relevanz von guter Wärmedämmung geschärft werden.

Hierfür wurde ein Thermohaus, welches aus drei gängigen Wandaufbauten, die in Kapitel 4.2 näher erläutert werden, besteht aufgebaut. Um eine aussagekräftige Messung zu ermöglichen ist ein Temperaturunterschied zwischen dem Innenraum und der Umwelt von mindestens 10 °C notwendig. Der Versuch wird in einem Laborraum realisiert, welcher im Normalfall eine Innentemperatur von ca. 20 °C hat. Damit ein Temperaturunterschied von mindestens 10 °C vorliegt, ist also im Innenraum des Thermohauses von Nöten. Im Versuch wird das Thermohaus Hilfe einer Wasserheizung, welche am Boden verläuft, verwirklicht, mit der das Thermohaus auf etwa 33 °C aufgeheizt wird.

Zur Auswertung sind sowohl die Innen - als auch die Außentemperaturen entscheidend. Die Innentemperaturen werden mit Hilfe von Thermofühlern gemessen und über ein mit LabVIEW programmiertes Tool erfasst und gespeichert. Die Außentemperatur wird mit Hilfe einer Wärmebildkamera gemessen. Die Auswertung der erhaltenen Temperaturdaten erfolgt dann über ein Tabellenkalkulationsprogramm wie beispielsweise Microsoft Excel.

Zu Beginn der Arbeit werden zunächst einige physikalischen Grundlagen zur Wärmebildkamera (Kapitel 2.1), die Wärmebildkamera als Messinstrument und die historische Entwicklung der Thermografie (Kapitel 2.2), sowie ihre Funktionsweise (Kapitel 2.3) vorgestellt. Anschließend werden die bauphysikalischen Grundlagen zur Wärmeleitung (Kapitel 3.1) und des Wärmedurchgangskoeffizienten (Kapitel 3.2), sowie der Wärmeleitfähigkeit (Kapitel 3.3) von Dämmstoffen. Daran anschließend wird ein Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit eines Dämmstoffes kurz erläutert (Kapitel 3.3.1) und

auf die Problematik Wärmebrücken im bestehenden Gebäude (Kapitel 3.4) eingegangen. Zum Abschluss der theoretischen Einführung werden die aktuellen Normen und Richtlinien des Bauwesens bezüglich der Wärmedämmung (Kapitel 3.5) und die Messaufnahme an bestehenden Gebäuden (3.6) erläutert. Im Versuchsteil wird dann die Methodik des Versuchsaufbaus genauer erklärt und beschrieben (Kapitel 4) sowie die Messergebnisse aufgezeigt und verifiziert.

2. Die Wärmebildkamera

Die Wärmebildkamera ist ein bildgebendes Messinstrument, welches Infrarotstrahlung, die für das menschliche Auge nicht sichtbar ist, aufnimmt und in ein für den Menschen sichtbares Bild umwandelt. Das Verfahren an sich, das hinter der Aufnahme eines Wärmebildes steckt, wird als Thermografie bezeichnet. Zusammenfassend gesagt ist die Wärmebildkamera das Messinstrument der Thermografie (vgl. Wallrabe 2001, S. 3).

Die Wärmebildkamera als Messinstrument wird seit einigen Jahren immer bedeutsamer, vor allem auch im Bereich der Untersuchung von bestehenden Gebäude zur Überprüfung der Fassadendämmung und dem Aufspüren von Wärmebrücken. Sie eignet sich hierfür besonders gut, da sie ein berührungsloses Messinstrument darstellt und eine Messung relativ einfach und schnell durchgeführt werden kann (vgl. Fouad und Richter 2012, S. 9).

Im Folgenden werden zunächst die physikalischen Grundlagen der Thermografie und deren Entwicklungsgeschichte erläutert. Anschließend wird genauer auf das Messinstrument Wärmebildkamera eingegangen, wobei die Funktionsweise und die Voraussetzungen für eine korrekte Messung erläutert werden.

2.1 Physikalische Grundlagen

Um die Funktionsweise einer Wärmebildkamera und deren Technik zur Aufnahme der Wärmebilder genauer verstehen zu können, sind zuvor einige physikalische Grundlagen zu betrachten. Zuerst wird erläutert, welche Messgröße überhaupt von dem Messinstrument aufgenommen wird, nämlich die elektromagnetische Strahlung. Danach erfolgen die Betrachtung eines idealen schwarzen Körpers und dessen Gesetzmäßigkeiten. Im Anschluss wird die Abweichung eines realen Körpers von dem idealen schwarzen Körper aufgezeigt und auf einen entscheidenden Punkt der Emissivität eingegangen.

2.1.1 Das elektromagnetische Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum zeigt die Gesamtheit der elektromagnetischen Wellen, meist aufgetragen gegen die Wellenlänge λ oder die Wellenzahl $\tilde{\nu}$ von den Radiowellen bis hin zu der Gamma-Strahlung. Dabei ist eine elektromagnetische Welle eine sinusschwingende Transversalwelle, was bedeutet, dass die Welle senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung schwingt. Die elektromagnetische Welle setzt sich zusammen aus

dem elektrischen und dem magnetischen Teil. Diese schwingen in Phase und mit derselben Frequenz, jedoch stehen sie senkrecht zueinander (vgl. Fouad und Richter 2012, S. 10).

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, wird das Spektrum in unterschiedliche Bereiche unterteilt. Diese Unterteilung ist willkürlich und unterscheidet sich durch die Methode zum Erzeugen und Messen von Strahlung (vgl. Schuster und Kolobrodov 2000, S.12).

Durch die DIN Norm 5031-7 ist die Einteilung einheitlich geregelt (siehe Tabelle 1).

Benennung der Strahlung		Spektralbereiche [3]					
		Kurzzeichen		Wellenlänge $\frac{\lambda}{nm}$	Frequenz $\frac{\nu}{THz}$	Wellenzahl $\frac{\sigma}{mm^{-1}}$	Photonenenergie $\frac{Q_e}{eV}$
Ultraviolettstrahlung [1]	Vakuum-*UV*	*UV*	*UV–C* < *VUV*	100 bis 200	3000 bis 1500	10 000 bis 5000	12,4 bis 6,2
	Fernes *UV*		*UV–C* < *FUV*	200 bis 280	1500 bis 1070	5 000 bis 3600	6,2 bis 4,4
	Mittleres *UV*		*UV–B*	280 bis 315	1070 bis 950	3 600 bis 3200	4,4 bis 3,9
	Nahes *UV*		*UV–A*	315 bis 380	950 bis 790	3 200 bis 2600	3,9 bis 3,3
Sichtbare Strahlung, Licht [2]		*VIS*		380 bis 780	790 bis 385	2 600 bis 1300	3,3 bis 1,6
Infrarotstrahlung [2]	Nahes *IR*	*IR*	*NIR* < *IR–A*	780 bis $140 \cdot 10^1$	385 bis 215	1 300 bis 700	1,6 bis 0,9
			NIR < *IR–B*	$140 \cdot 10^1$ bis $300 \cdot 10^1$	215 bis 100	700 bis 330	0,9 bis 0,4
	Mittleres *IR*		*IR–C* < *MIR*	$300 \cdot 10^1$ bis $500 \cdot 10^2$	100 bis 6	330 bis 20	0,4 bis 0,025
	Fernes *IR*		*IR–C* < *FIR*	$500 \cdot 10^2$ bis 10^6	6 bis 0,3	20 bis 1	0,025 bis 0,001

Tabelle 1: Einheitliche Einteilung der Spektralbereiche nach der DIN Norm 5031-7

Dem in Abbildung 2 gezeigten Spektrum ist zudem zu entnehmen, dass das sichtbare Licht, also die elektromagnetische Strahlung die wir wahrnehmen können und die uns damit am vertrautesten ist, in der Mitte des gesamten Spektrums (Wellenlänge λ 380 - 780 nm) liegt. Dieser Wellenlängenbereich wird bei der Aufnahme einer gewöhnlichen Fotografie detektiert und entweder durch eine photochemische Reaktion oder durch einen Sensor aufgenommen und festgehalten.

Zwar ist der prinzipielle Aufbau einer Wärmebildkamera der klassischen Kamera sehr ähnlich, allerdings liegt der entscheidende Unterschied darin, dass bei der Aufnahme eines Wärmebilds mit der Wärmebildkamera die Intensität der Wärmestrahlung, die sich im Spektrum neben dem sichtbaren Licht in dem Wellenlängenbereich λ von 780- 10^6 nm befindet, was der Infrarotstrahlung (IR) entspricht, detektiert wird (vgl. Wallrabe 2001, S. 2).

Die für die Bauthermografie interessanten Bereiche befinden sich bei einer Wellenlänge von 3 - 5 µm und hauptsächlich im Bereich von 8 - 14 µm (vgl. Fouad und Richter 2012, S. 10).

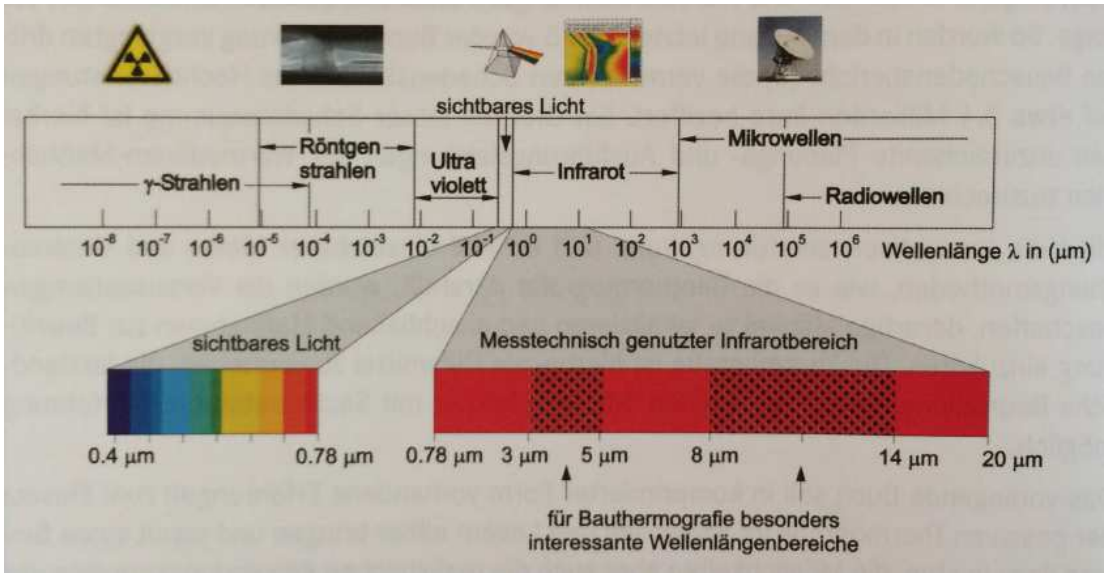


Abbildung 2: Das elektromagnetische Spektrum (Fouad und Richter 2012, S. 10).

Die Thermografische Messmethode beruht auf der Tatsache, dass jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt (-273,15 °C) eine Eigenstrahlung aussendet, wobei die Ursache hierfür in der inneren mechanischen Molekülbewegung liegt (vgl. Fouad und Richter 2012, S. 10).

2.1.2 Strahlung des schwarzen Körpers

Ein schwarzer Körper stellt in der Thermografie ein ideales Modell dar, welches zur Erkenntnisgewinnung und Überprüfung von Gesetzmäßigkeiten dient. Aufgrund der Gesetzmäßigkeiten des schwarzen, idealen Körpers lässt sich dann auf das Verhalten der realen Körper (siehe Kapitel 2.1.3) schließen. Dabei ist der schwarze Strahler definiert als ein Objekt, das die auftreffende elektromagnetische Strahlung vollständig absorbiert und der Körper ist, der bei gleicher Temperatur die größtmögliche Intensität der abgegebenen Strahlung besitzt. Dieser Zusammenhang wird durch das Kirchhoffsche Gesetz beschrieben. Die Gesetze, die durch Betrachtung eines idealen Körpers ermittelt werden, stellen jedoch einen Grenzwert dar, dem sich in der Realität angenähert werden kann (vgl. Weber 1982, S. 77).

Technisch realisiert werden kann der schwarze Körper zum Beispiel mit Hilfe eines kugelförmigen Hohlkörpers, dessen Wände von innen rußgeschwärzt sind. Der Aufbau ist in Abbildung 3 zu sehen. Die folgenden drei Gesetzmäßigkeiten, das Planck'sche Strahlungsgesetz, das Stefan-Boltzmann-Gesetz und das Wiensche Verschiebungsgesetz, beschreiben das Verhalten eines idealen schwarzen Körpers (vgl. Schuster und Kolobrodov 2000, S. 56).

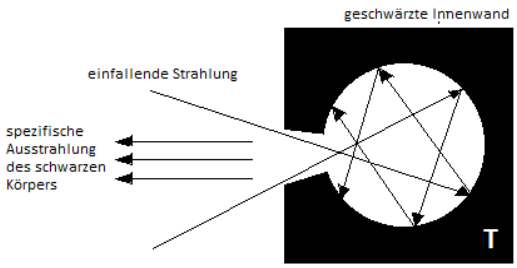


Abbildung 3: Modellvorstellung eines schwarzen Körpers (nach Fouad und Richter 2012, S.11).

Ein idealer schwarzer Körper zeichnet sich dadurch aus, dass er im Vergleich zu anderen Körpern, die dieselbe Temperatur haben, die größtmögliche Strahlungsintensität aufweist. Das kommt daher, dass vom Hohlraum stets die gleiche Strahlungsheizung absorbiert wie emittiert wird, denn nur so kann gewährleistet werden, dass die absolute Temperatur gemessen werden kann (vgl. ebd., S. 56).

2.1.2.1 Plancksches Strahlungsgesetz

Das Plancksche Strahlungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der Temperatur des schwarzen Körpers und der spezifischen Ausstrahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ. Die spektrale spezifische Ausstrahlung mit der Einheit $\frac{W}{cm^2 \cdot \mu m}$ kann mit Hilfe der Gleichung 1 berechnet werden:

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1} \qquad (1)$$

mit:

M_λ: spektrale spezifische Ausstrahlung
c_1: 1. Strahlungskonstante = $3{,}7418 \cdot 10^4\ W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^4$
c_2: 2. Strahlungskonstante = $1{,}4388 \cdot 10^4\ K \cdot \mu m^4$
T: absolute Temperatur T [K] = 273,15 + θ [°C]
λ: Wellenlänge [µm]

(vgl. Fouad und Richter 2012, S. 12).

In Abbildung 4 ist das Planksche Strahlungsgesetz, also die Auftragung von der spektralen spezifischen Ausstrahlung gegen die Wellenlänge für verschiedene absolute Temperaturen T dargestellt. Bei der Betrachtung wird deutlich, dass kalte Körper im Bereich der für uns nicht sichtbaren Wärmestrahlung strahlen, warme Körper dagegen auch im Bereich des für uns sichtbaren Lichts strahlen können.

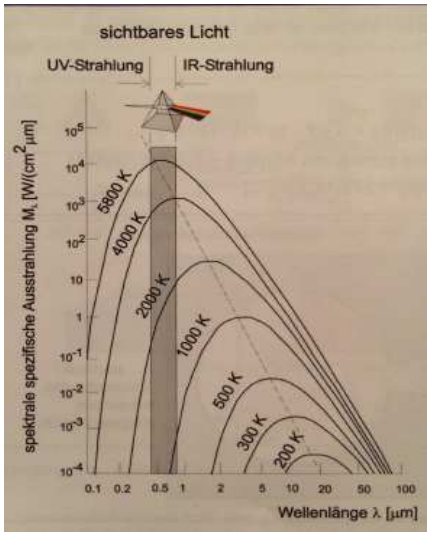


Abbildung 4: Plancksches Stahlungsgesetz (Fouad und Richter 2012, S. 12).

2.1.2.2 Stefan-Boltzmann-Gesetz

Mit Hilfe des Stefan- Boltzmann-Gesetz lässt sich die gesamte Energiemenge berechnen, die ein schwarzer Strahler in Abhängigkeit von der Temperatur abgibt.

Hierzu wird die Gleichung 1 über die Wellenlänge integriert:

$$M = \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} M_\lambda d\lambda = \sigma \cdot T^4 \qquad (2)$$

mit:

M_λ: spektrale spezifische Ausstrahlung
σ: Stefan-Boltzmann-Konstante = 5,67 · $10^{-8}\ W/(m^2 \cdot K^4)$
T: absolute Temperatur T [K] = 273,15 + θ [°C]
λ: Wellenlänge [µm]

(vgl. Fouad und Richter 2012, S.11 ff.)

2.1.2.3 Wiensches Verschiebungsgesetz

Diese Gesetzmäßigkeit macht die Abhängigkeit zwischen der absoluten Temperatur des schwarzen Strahlers und des Strahlungsmaximums deutlich. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, verschiebt sich mit steigender Temperatur das spezifische Ausstrahlungsmaximum in Richtung der kürzeren Wellenlängen. Dieses Gesetz wird mit folgender Gleichung beschrieben:

$$\lambda_{max} = \frac{2898K \cdot \mu m}{T} \qquad (3)$$

mit:

T: absolute Temperatur T [K] = 273,15 + θ [°C]
λ: Wellenlänge [µm]

(vgl. Schuster und Kolobrodov 2000, S. 57).

2.1.3 Strahlungsgesetze realer Körper

Im Wesentlichen unterscheidet sich das Verhalten eines schwarzen Körpers im Vergleich zum realen Körper bei Betrachtung der Strahlungsgesetze darin, dass unterschiedliche Wechselwirkungen mit der auftreffenden Strahlung vorliegen. Hierzu müssen die Phänomene Absorption, Reflexion und Transmission betrachtet werden. Bei einem idealen schwarzen Körper wird die auftreffende Strahlung vollständig absorbiert und damit sind der Reflexionsgrad und der Transmissionsgrad gleich Null. Bei realen Körpern dagegen tritt die Absorption, die Transmission und Reflexion, je nach Beschaffung der Körper, unterschiedlich ausgeprägt auf (vgl. Fouad und Richter 2012, S.15 f.).

Bei realen Körpern wird nur ein Bruchteil der Strahlung absorbiert, der Rest der Strahlung wird dagegen reflektiert oder geht durch den Körper hindurch (Transmission). In Abbildung 5 sind die drei Vorgänge bildlich dargestellt. Das Verhalten realer Körper ist entscheidend für die Messung mit der Wärmebildkamera (vgl. Fouad und Richter 2012, S. 15), denn ein realer Körper emittiert stets weniger Strahlung als ein schwarzer Körper. Dabei hängt die Menge an emittierter Strahlung mit der Oberflächenbeschaffenheit des Prüfkörpers zusammen. Soll aufgrund der emittierten Strahlung also auf die absolute Temperatur geschlossen werden, so muss die Emissionsgrad bekannt sein (vgl. Fouad und Richter 2012, S. 16).

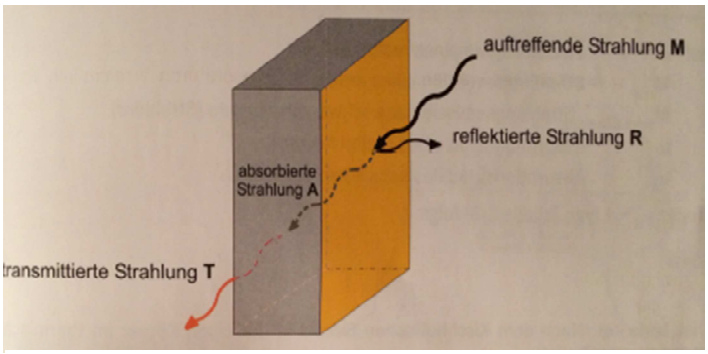


Abbildung 5: Mögliche Wechselwirkungen der auftreffenden Strahlung auf einem realen Körper (Fouad und Richter 2012, S. 15).

Im folgenden Kapitel wird der Emissionsgrad und dessen Berücksichtigung bei der Messung näher erklärt.

2.1.3.1 Der Emissionsgrad

Unter dem Begriff Emissionsgrad wird das Verhältnis zwischen der abgegebenen Strahlungsintensität eines realen Körpers und der Strahlungsintensität eines schwarzen Körpers, bei derselben Temperatur, verstanden. Dabei kann der Emissionsgrad Werte von Null bis Eins annehmen. Wie in Kapitel 2.1.3 erklärt wurde, ist die Strahlungsintensität eines realen Körpers stets kleiner als die eines schwarzen Körpers. Daher ist der Wert für den Emissionsgrad stets kleiner als eins. Um eine richtige quantitative Messung durchführen zu können ist es entscheidend dieses Emissionsgrad zu kennen und in die Kamera korrekt einzugeben (vgl. Zimmermann und Zimmermann 2012, S. 58).

Mit folgender Gleichung kann der Emissionsgrad berechnet werden:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M_{real}}{M_{schwarzer\ Körper}} \qquad (4)$$

mit:

ε: Emissionsgrad der realen Körpers
M_{real}: Strahlungsemission realer Körper
$M_{schwarzer\ Körper}$: Strahlungsemission schwarzer Körper

(vgl. Fouad und Richter 2012, S.16).

Hierbei ist es wichtig zu beachten, dass unterschiedliche Werkstoffe unterschiedliche Emissivitäten aufweisen. In der Literatur sind Listen über die Emissionsgrade üblicher Baustoffe zu finden. Jedoch sind die Werte für den Emissionsgrad abhängig von der Temperatur des Prüfobjekts und der vom Körper emittierten Wellenlänge. Daher können die aufgeführten Werte in Tabelle 2 nur als Richtwerte gesehen werden (vgl. Zimmermann und Zimmermann 2012, S. 71).

Oberfläche	**Emissionsgrad**
Beton	0,90 – 0,95
Holz	0,90 – 0,95
Ziegel	0,88 -0,93
Mörtel	0,94
Glas	0,8-0,95

Tabelle 2: übliche Emissionsgrade im Temperaturbereich von ca. -10 °C bis 100 °C und einem Wellenlängenbereich von λ = 8-14 µm (nach Fouad und Richter 2012, S. 19).

Wird für die Messung in der Kamera ein zu niedriger Wert für den Emissionsgrad eingegeben, so hat das zu Folge, dass der von der Wärmebildkamera ausgegeben Wert für die Oberflächentemperatur zu groß ist. Wenn der Emissionsgrad jedoch zu groß angenommen wird führt dies dazu, dass die Wärmebildkamera einen zu kleinen Wert für die Oberflächentemperatur angibt (vgl. Fouad und Richter 2012, S. 39 f.).

2.2 Historische Entwicklung der Thermografie

Bis eine Wärmebildkamera so nutzbar wurde wie sie es heute ist, mussten einige Entdeckungen und Entwicklungen im Bereich der Optik, Physik, Elektronik, Mathematik und auch der Mechanik gemacht werden. Die Thermografie stellt also „ein entwicklungsgeschichtliches Gesamtergebnis“ (vgl. Zimmermann und Zimmermann 2012, S.2) dar. In diesem Kapitel werden einige entscheidenden Meilensteine der Thermografie vorgestellt.

Eine ganz grundlegende Entdeckung wurde im 17. Jahrhundert von Isaac Newton gemacht. Er erkannte mit Hilfe von Versuchen, dass das Licht in seine Spektralfarben zerlegt werden kann (vgl. ebd., S. 10).

1800 entdeckte dann Herschel zufällig, durch Wiederholung des Experiments von Newton, die Infrarotstrahlung, in dem er die Temperaturen der Spektralfarben untersuchte und nach Ende des roten Lichts ein Maximum der Temperatur fand. Das Jahr 1840 gilt als Jahr der Geburtsstunde der Infrarot-Thermografie. In diesem Jahr gelang es dem Sohn von Herschel ein „Wärmebild“ der Sonne sichtbar zu machen, indem er einen berußten Streifen Löschpapier in Alkohol tränkte (vgl. Weber 1982, S. 64 f.; Schuster und Kolobrodov 2000, S. 15).

Ein weiterer Meilenstein der Infrarot-Thermografie war das von Langley im Jahre 1880 erfundene Bolometer, welches aus einem dünnen geschwärzten Platinenwiderstand bestand, der in eine Wheatstone-Brückenschaltung eingebaut war. Ein Bolometer dient dabei zum Messen der Energie elektromagnetischer Strahlung (vgl. ebd., S.65 und Zimmermann und Zimmermann 2012, S. 16).

Durch den ersten und zweiten Weltkrieg wurde die Entwicklung der Infrarot-Thermographie weiter vorangetrieben, um sie militärisch nutzen zu können. Zwischen den Weltkriegen kam

es zur Entwicklung des Evaporagrafens durch Czerny. Bei diesem Gerät wurde das Wärmestrahlungsmuster, das von einem Objekt ausgesendet wird auf einer mit Naphthalin behandelte, thermisch isolierten Membran abgebildet, jedoch betrug die Belichtungszeit für eine Aufnahme einige Stunden (vgl. Weber 1982, S. 65 f.).

Nach dem zweiten Weltkrieg wurden dann Geräte entwickelt, bei denen Photodetektoren eingesetzt wurden, welche eine schnellere und genauere Aufnahme ermöglichten.

Ab Mitte der 60er Jahre, waren die Geräte dann soweit entwickelt, dass Echtzeitaufnahmen, das heißt Aufnhamen mit kurzen Belichtungszeiten, möglich wurden (vgl. ebd., S. 66 f. und Schuster und Kolobrodov 2000, S. 16).

2.3 Messaufnahme mit der Wärmebildkamera

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt handelt es sich bei der Wärmebildkamera um ein zerstörungsfreies Prüfmittel, was bedeutet, dass die Gebrauchseigenschaft des Prüfstücks nicht beeinträchtigt wird (vgl. Zimmermann und Zimmermann 2012, S. 112). Zusätzlich können schlecht zugängliche Messobjekte und auch Flächen und Körper mit geringer Wärmeleitfähigkeit vermessen werden. Aufgrund dieser Vorteile eignet sich das Verfahren besonders für Messungen in der Baubranche. Ein weiterer Vorteil ist, dass auch sehr hohe Temperaturen vermessen werden können, welchen ein berührendes Messverfahren nicht standhalten könnte (vgl. Weber 1982, S. 52).

Es wird zwischen verschiedenen Techniken, der qualitativen, der vergleichenden und der quantitativen, von Messungen mit einer Wärmebildkamera, je nach dem welches Ziel verfolgt wird, unterschieden.

Wird als Ziel der Messung alleine die flächenhafte Strahlungsverteilung über das Prüfobjekt darzustellen verfolgt, so genügt eine qualitative Messung aus. Ein Beispiel hierfür wäre das Aufdecken von Wärmebrücken in einer Fassade.
Bei der vergleichenden Thermografie werden Temperaturdifferenzen betrachtet. Entweder durch die Aufnahme eines Prüfobjekts zu unterschiedlichen Zeitpunkten oder durch den Vergleich unterschiedlicher Prüfobjekte zur selben Zeit.
Dagegen ist eine quantitative Messung sehr viel aufwändiger zu realisieren. Um bei einer quantitativen Messung aussagekräftige Werte zu erhalten, müssen einige

Umgebungsmerkmale beachtet werden. In diesem Versuch sollen quantitative Messungen durchgeführt werden, weshalb die entscheidenden Punkte für eine validierte Messung im folgenden Kapitel aufgeführt werden (vgl. ebd., S. 110 f.).

Eine weitere Unterscheidung ist, ob eine passive oder eine aktive Messung vorliegt. Bei einer passiven Messung wird allein die Strahlung aufgenommen, die durch die Eigenwärme des Prüfobjekts abgestrahlt wird. Dagegen wird bei einer aktiven Messung zusätzlich eine externe Energiequelle eingesetzt, die einen Wärmefluss in dem zu überprüfenden Material erzeugt (vgl. ebd. S. 110).
Bei dem vorgestellten Versuch handelt es sich also um eine aktive Messung, da hier von innen das Thermohaus gezielt mit einer Wasserheizung geheizt wird.

Wie genau eine Wärmebildkamera aufgebaut ist und ihre Funktionsweise wird dann in den Kapiteln 2.3.2 und 2.3.3 näher erläutert. Anschließend werden einige Laborversuche vorgestellt, in denen die Wärmebildkamera als Messinstrument zum Einsatz kommt (Kapitel 2.3.4).

2.3.1 Voraussetzung für eine korrekte quantitative Messung

Neben der Einstellung des richtigen Emissionsgrades in der Kamera (Kapitel 2.1.3.1) müssen weitere Parameter bei einer quantitativen Messung berücksichtigt werden. Die wichtigsten, wie die Atmosphäre, die Umgebungstemperatur, die Temperaturdifferenz und die Fremdstrahlung, sowie weitere Einflüsse, werden im Folgenden erläutert.

2.3.1.1 Atmosphäre

Bei der Messung mit der Wärmebildkamera im Bauwesen spielt die Beschaffenheit der Atmosphäre eine entscheidende Rolle. Da es sich bei der Thermografie um eine berührungslose Messmethode handelt, muss die abgegebene Strahlung zunächst die Atmosphäre passieren, bis sie detektiert werden kann. Je nach Beschaffenheit der Atmosphäre wird ein Teil der Strahlung hierbei absorbiert, reflektiert und gestreut. Dabei kommt es zur Dämpfung der Strahlung. Je mehr Wegstrecke die Strahlung zurück legen muss, umso weniger kommt letztendlich bei der Wärmebildkamera an (vgl. Fouad und Richter 2012, S. 28 f.).

Vor allem Nebel, Regen oder Schnee beeinflusst die IR-Strahlung stark, wodurch es zur Verfälschung der Messergebnisse kommt. Aber auch bei normalen Witterungsverhältnissen

befinden sich in der Atmosphäre gasförmiges Wasser und Kohlenstoffdioxid, wodurch es zu einer Dämpfung der IR-Strahlung kommt. Ab einer Entfernung von 10 Metern zwischen der Wärmebildkamera und dem Messobjekt muss ein Korrekturfaktor einbezogen werden, um richtige Werte zu erhalten (vgl. Weber 1982, S. 97).

Da es sich bei dem vorgestellten Versuch um einen Laborversuch handelt und damit der Versuchsaufbau keinen Witterungen ausgesetzt ist und der Abstand zwischen Kamera und Messobjekt geringer ist, hat dieser Einfluss wenig Relevanz für den Versuch.

2.3.1.2 Umgebungstemperatur

Eine Wärmebildkamera berechnet die einfallende Strahlung in eine Temperaturangabe um. Dies geschieht in Abhängigkeit von der eingegebenen Umgebungstemperatur. Deshalb ist es, um richtige Messwerte zu erhalten, essentiell, dass der Kamera ein richtiger Wert vorgegeben wird. Hierfür wird die Kamera mit einem möglichst idealen schwarzen Körper kalibriert (vgl. Weber 1982, S. 96).

Wie diese Kalibrierung der Kamera auf die Umgebungstemperatur laut Hersteller durchgeführt wird, wird in Kapitel 4.1.3 erläutert.

2.3.1.3 Temperaturdifferenz

In der Literatur wird üblicherweise ein Wert von 10 - 15 Kelvin zwischen der Außenwand und der Innenwand angegeben um eine aussagekräftige Messung durchführen zu können. Jedoch ist die erforderliche Temperaturdifferenz auch vom verwendeten Baustoff und der vorliegenden Wanddicke abhängig. Üblicherweise geht man in der Bauthermografie von einer Innentemperatur von ca. 20 °C aus. Daher ist eine Messung in den kälteren Jahreszeiten empfehlenswert, wenn eine Außentemperatur von ca. 5 °C vorliegt (vgl. Weber 1982, S. 96).

In dem vorgestellten Versuch wird dagegen das Haus von innen soweit hoch geheizt, dass eine Temperaturdifferenz von etwa 13 °C vorliegt.

2.3.1.4 Fremdstrahlung

Unter Fremdstrahlung wird die Infrarotstrahlung verstanden, die nicht vom zu untersuchenden Objekt stammt. Bei der Fremdstrahlung handelt es sich um einen Einfluss der zu deutlichen Verfälschungen der Messergebnisse führen kann. Die entscheidende Fremdstrahlungs-Quelle stellt dabei die Sonne dar. Deshalb werden Messungen in der

Bauthermografie auch häufig in der Nacht durchgeführt (vgl. Weber 1982, S. 97; Fouad und Richter 2012, S.31).

Dieses Problem liegt bei einem Laborversuch eher bedingt vor, solange eine Abdunkelung des Raumes oder eine Abschirmung des Versuchsabbaus von der Sonne möglich ist.

Allerdings muss auch im Labor ausgeschlossen werden, dass sich andere Wärmequellen in unmittelbarer Nähe befinden. Selbst eine Person kann bereits Einfluss auf eine Messung haben. Vor allem tritt bei der Vermessung der Fenster manchmal folgender Trugschluss auf: „Bei der Begutachtung von Fenstern auf deren Dichtigkeit wird am unteren Fensterrahmen eine Stelle mit einer deutlich höheren Oberflächentemperatur geortet und daraus der Schluß eines undichten Fensters gezogen. Tatsächlich handelt es sich um die durch das Fensterbrett reflektierte, von dem Gerätebediener ausgehende, IR-Strahlung“ (Weber 1982, S. 98).

2.3.1.5 Weitere Einflüsse

Als weiterer Einflussfaktor in der Bauthermografie im Freien ist die Luftbewegung zu nennen. Durch Wind kommt es zur Abkühlung der Wandoberflächen. Deshalb sind Baudiagnosen nur bei einem maximalen Wert von 0,3 m/sec möglich (vgl. Weber 1982, S. 98).

2.3.2 Funktionsweise der Wärmebildkamera

Der prinzipielle Aufbau einer Wärmebildkamera ähnelt dem einer normalen bildgebenden Kamera sehr stark. Die Hauptbestandteile sind ein lichtdichtes Gehäuse, ein Objektiv aus einer oder mehreren Linsen und einem Detektor. Bei einer analogen Kamera besteht dieser Detektor aus einer lichtempfindlichen Schicht, bei einer digitalen Kamera und einer (digitalen) Wärmebildkamera dagegen aus digitalen Sensoren.

Bei den Linsen liegt zwischen den beiden Kameraarten ein entscheidender Unterschied vor. Während bei der bildgebenden Kamera die Linsen aus Glas bestehen, werden bei der Wärmebildkamera Linsen aus z.B. Germanium eingesetzt. Der Grund dafür ist, dass optische Materialien aus Glas für langwellige Strahlung, wie die Infrarotstrahlung, nicht durchlässig sind, deshalb benötigt man in der IR-Thermografie besondere infrarotdurchlässige Linsen (vgl. Fouad und Richter 2012, S.54).

Es wird bei der Wärmebildkamera zwischen zwei unterschiedliche Arten von Detektoren, den thermischen Detektoren und den Quantendetektoren, unterschieden. Diese Detektortypen werden in den Kapiteln 2.3.2.3 und 2.3.2.4 näher erläutert.

Eine weitere Kategorie, in die die Wärmebildkameras eingeordnet werden können, ist die des Kamerasystems. Es wird dabei zwischen der scannenden Kameraeinheit, bei der nur ein Detektor bzw. eine Detektorleiste vorhanden ist und der Focal Plane Array (FPA) Kameras, in der die Detektoren eine Empfängermatrix bilden, unterschieden (vgl. Fouad und Richter 2012, S.47).
Diese beiden Arten der Kamerasysteme werden in den beiden folgenden Kapiteln näher erläutert.

2.3.2.1 Scanner- Thermografie

Wie bereits oben erwähnt, bestehen die Scanner-Kameras aus nur einem Detektorelement, damit also ein Bild entstehen kann, muss es in der Kamera ein „optomechanisches Ablenksystem“ geben. Dieses Ablenksystem wird Scanner genannt und scannt das zu untersuchende Objekt, indem er es rasterartig abtastet. Um dies möglich zu machen, muss es sowohl in der vertikalen Richtung als auch in der horizontalen Richtung eine Abtastungsvorrichtung geben. Hierzu werden unterschiedliche Vorrichtungen verwendet. Vorteil dieses Kamerasystems ist die hohe thermische Auflösung, die dadurch entsteht, dass jeder Bildpunkt mit genau demselben Detektor aufgenommen wird und damit die Aufnhame sehr homogen ist. Jedoch ist die Abtastung der einzelnen Bildpunkte recht zeitaufwändig und somit der Bildaufbau relativ langsam (vgl. Fouad und Richter 2012, S.48 f.).

In der Literatur sind vier verschiedene Arten der Ablenkungsvorrichtungen der Planspiegel, das Spiegelpolygon, das Polygonprisma und das Drehkeilpaar zu finden, die nachfolgend erläutert werden (vgl. Schuster und Kolobrodov 2000, S. 107 ff.).

Planspiegel (ebener Oberflächenspiegel):
Ein Planspiegel ist das einfachste Ablenksystem. Durch die Stellung des Spiegels wird das zu erfassende Bildfeld definiert. Besonders geeignet ist er als Abtastvorrichtung, wenn ein paralleler Strahlengang vorliegt (vgl. ebd., S. 107).

Spiegelpolygon:

Mit dieser Vorrichtung ist eine hohe Abtastgeschwindigkeit möglich, da es sich um eine kontinuierliche Drehbewegung handelt (vgl. ebd., S. 109).

Polygonprisma:

Bei einem Polygonprisma erfolgt die Strahlungsablenkung durch Brechung, wobei die Polygone eine gerade Flächenanzahl haben.

Drehkeilpaar:

Diese Vorrichtung besteht aus zwei gleichen optischen Keilen, wobei die Brechzahl und der Keilwinkel die Ablenkung der Strahlung bestimmt. Hierbei handelt es sich um eine mechanisch sehr stabile Abtastung (vgl. ebd., S. 113).

In Abbildung 7 ist ein exemplarischer schematischer Aufbau einer Scanner-Kamera mit den Ablenkungsvorrichtungen Planspiegel und Spiegelpolygon zu sehen.

2.3.2.2 FPA -Thermografie

Bei dieser Art des Kamerasystems wird die gesamte einfallende Strahlung auf eine Detektormatrix, die aus vielen Empfängersensoren besteht, gelenkt. Dieses System hat sich vor allem in den letzten Jahren auf dem Markt stärker durchgesetzt. Diese Technik ermöglicht es ein Bild direkt aufzunehmen und die optomechanische Technik entfällt hierbei, sodass eine schnelle Bildfolge möglich wird. Die Auflösung ergibt sich durch die Anzahl der Sensoren die auf der Matrix angebracht sind, wobei ein Sensor einem Pixel entspricht (vgl. Fouad und Richter 2012, S.51). In Abbildung 6 ist ein exemplarischer und schematischer Aufbau einer solchen Kamera zu sehen.

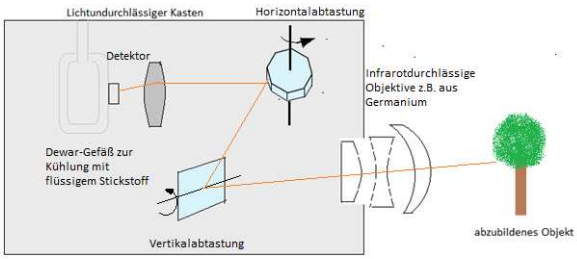


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Bilderzeugung einer stickstoffgefüllten Scannerkamera (nach Fouad und Richter 2012, S.48).

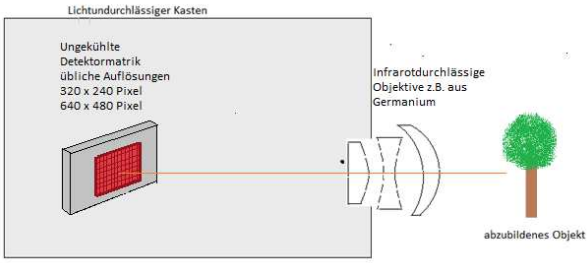


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Bilderzeugung einer FPA-Kamera (nach Fouad und Richter 2012, S. 52).

2.3.2.3 Thermische Detektoren

Das entscheidende an diesen Detektoren ist, dass mit ihnen auch bei Raumtemperatur Messungen durchgeführt werden können. Mikrobolometer oder pyroelektrische Detektoren gelten als thermische Detektoren und haben die Eigenschaft, dass sie durch auftreffende Strahlung direkt erwärmt werden, was wiederrum zu einer Veränderung des elektrischen Signals führt. Diese Signalveränderung kann mit Hilfe eines Computers dann ausgewertet werden und es ist möglich die empfangenen Informationen dazu zu verwenden ein Bild zu simulieren (vgl. Schuster und Kolobrodov 2000, S.161 f.; Fouad und Richter 2012, S.47).

Bei dieser Art des Detektors ist keine Kühlung des Geräts notwendig, was einen deutlichen Vorteil gegenüber den quantenmechanischen Detektoren darstellt. Allerdings können mit diesem Gerät nur bedingt schnelle Temperaturänderungen aufgenommen werden, auf Grund der thermischen Masse der Detektoren. Diese Detektorart wird hauptsächlich in den FPA-Kameras eingesetzt (vgl. Fouad und Richter 2012, S.47 f.).

Die im Versuch eingesetzte Kamera ThermaCam™ B360 der Firma FLIR ist eine Kamera, die mit solchen thermischen Detektoren ausgestattet ist.

Der grundsätzliche Aufbau eines thermischen Detektors ist in Abbildung 8 zu sehen. Auf einem Substrat mit einer wärmeisolierenden Stützkonstruktion wird das Detektormaterial aufgebracht. Im Inneren des Substrats führen Leiterbahnen von den Anschlüssen des Detektorblocks zur Ausleseschaltung. Dabei befinden sich übliche Größen der Detektoren im Bereich von 20 bis 100 µm (vgl. Wallrabe 2001, S. 244).

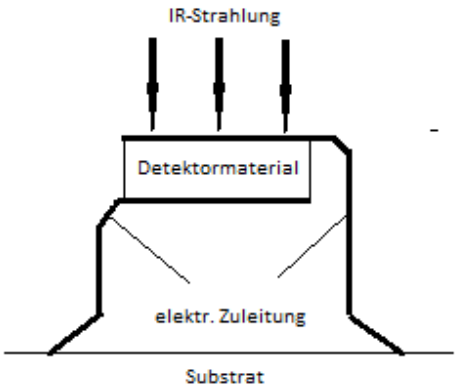


Abbildung 8: Prinzipieller Aufbau eines thermischen Detektorelements (nach Wallrabe 2001, S. 245).

2.3.2.4 Quantendetektoren

Bei den Quantendetektoren basiert die Detektion darauf, dass sie die Wechselwirkung zwischen Materie und Strahlung zur Signalauswertung nutzen, also den inneren fotoelektrischen Effekt. Dies bedeutet, dass die einfallende Strahlung direkt in Wechselwirkung mit den Elektronen des Detektormaterials tritt (vgl. Schuster und Kolobrodov 2000, S.163).

Somit fungiert diese Art der Detektoren als Photonenzähler. Das Auftreffen von Strahlung führt zu einer sofortigen Widerstandsänderung. Somit kann eine Kamera mit diesem Detektortyp zur schnellen Messung verwendet werden. Außerdem zeichnet diesen Detektortyp aus, dass er eine hohe spezifische Detektivität, im Vergleich zu den thermischen, aufweist. Dabei ist jedoch zu beachten, dass eine Kamera mit diesem Detektortyp bei sehr tiefen Betriebstemperaturen von ca. 77 K zu verwenden ist. Hierfür ist also eine aufwendige Kühlung notwendig, die beispielsweise durch direkte Kühlung mit Flüssiggas oder die Kühlung mit Hilfe einer Stirlingmaschine vorgenommen werden kann. Diese Detektoren werden sowohl in den Scanner-Kameras als auch in den FPA-Kameras eingesetzt (vgl. Fouad und Richter 2012, S.47 ff.; Wallrabe 2001, S.262).
Es wird zwischen zwei Arten von Fotoelementen unterschieden, den intrinsischen (Eigenfotoleiter) und den extrinsischen (Störstellenfotoleiter).

Im Folgenden soll aber nur auf das intrinsischen Fotoelement kurz eingegangen werden, um das Grundprinzip zu verdeutlichen.

In Abbildung 9 ist die grundsätzliche Funktionsweise eines intrinsischen Quantendetektors schematisch veranschaulicht. Typische Materialien für die intrinsischen Fotoleiter im IR-Bereich sind PbS, PbSe, InSb und HgCdTe. Trifft Strahlung auf den IR-Quantenempfänger, so werden Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband angehoben und die Leitfähigkeit steigt dadurch. Diese

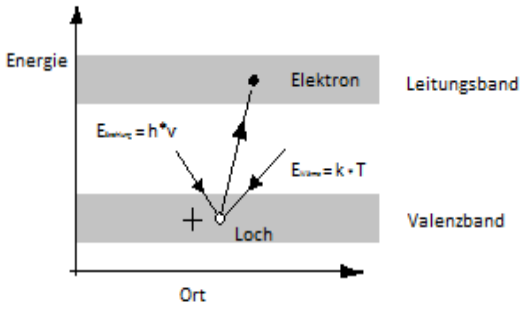


Abbildung 9: Erzeugung eines Leitungselektrons durch Absorption eines Strahlungsquants oder durch Aufnahme von Wärmenergie (nach Wallrabe 2001, S. 263).

Veränderung der Leitfähigkeit wird gemessen (vgl. Schuster und Kolobrodov 2000, S. 166).

Der Grund warum für diese Art von Detektor eine Kühlung benötigt wird ist der, dass es durch die innere Wärmeenergie, also die Bewegung der Atome, auch zu einem Anheben von Elektronen in das Leitungsband kommen kann. Diese würden dann einen elektrischen Rauschstrom erzeugen. Um diesen möglichst gering zu halten, wird bei sehr niedrigen Temperaturen gemessen (vgl. Wallrabe 2001, S. 264).

2.4 Derzeitiger Einsatz der Wärmebildkamera und Laborversuche

Auch in der Forschung stellt die Wärmebildkamera ein wichtiges Messinstrument dar. Beispielsweise werden an der Universität Hannover Versuchsserien zur Ermittlung der U-Werte von Dämmmaterialien und Baustoffproben durchgeführt.
Aber nicht nur das Dämmverhalten von Baustoffen spielt eine Rolle, sondern beispielsweise auch die Belastbarkeit eines Materials wie etwa Hochleistungsbeton. Wie belastbar ein Baustoff ist und an welcher Stelle die höchste Belastung vorliegt, lässt sich ebenso mit der Wärmebildkamera sichtbar machen (vgl. Fouad und Richter 2012, S. 144 ff.).

Die Wärmebildkamera als Thermografie-Instrument kommt aber nicht nur im Bauwesen bei Untersuchungen zum Einsatz, sondern wird in weiteren technischen Disziplinen wie im Maschinenbau und der Prozessteuerung, bei der Feuerwehr für die Personenauffindung und zur Aufspürung von Glutnestern, in der Medizintechnik und in der Militärtechnik eingesetzt (vgl. Fouad und Richter 2012, S. 159).
Andere Einsatzgebiete sind die Personenaufspürung durch die Polizei, die Überprüfung elektronischer Bauteile und beispielsweise auch die Bekämpfung von Epidemien.

Derzeit wird die Wärmebildkamera auch an den Flughäfen als Überprüfungsmittel gegen die Epidemien Ebola eingesetzt: „Weltweit rüsten sich bereits viele Länder auf ihren Flughäfen gegen den Ebola-Erreger. Bei der Überprüfung von Reisenden aus den von der Seuche betroffenen Gebieten setzen Staaten auf Befragungen, Wärmebildkameras oder Fiebermessungen” (vgl. n-tv.de 2014).

Des Weiteren wird die Wärmebildkamera auch immer häufiger für spezielle Laborversuche auch an den Universitäten eingesetzt. Einige Beispiele sollen hier kurz aufgeführt werden.

An der Hochschule Offenburg wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer-, Aluminium-, und Eisenstäben mit Hilfe der Wärmebildkamera ermittelt (vgl. Marius Meier 2010).

An der Uni Karlsruhe wurde eine Arbeit zum Thema „Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis“. Unter anderem war es bei dieser Fragestellung wichtig die Temperatur zu messen, um durch die und andere Parameter die wesentlichen Mechanismen des Kraftübertragungsprozesses zu ermitteln. Dabei wurde die Temperatur mit Hilfe der Wärmebildkamera aufgenommen (vgl. Gießler 2012, S.10).

An der Universität Kassel besteht die Idee einer Masterarbeit zum Thema „Experimentelle Untersuchung eines Absorptionsvorgangs zur Lufttrocknung mittels Thermografie“. Als Ziel dieser Arbeit soll herausgefunden werden, inwieweit der Absorptionsvorgang an einem Textil mit Hilfe einer Wärmebildkamera aufgezeichnet und bestimmt werden kann (vgl. Universität Kassel 2014).

Aber nicht nur im technischen Bereich, sondern auch zur Forschung von Bioorganismen, kommt die Wärmebildkamera zum Einsatz. Beispielsweise wurden an der Justus-Liebig-Universität Gießen Verhaltensuntersuchungen von Kaninchen mit Hilfe von Wärmebildkameras durchgeführt. Bei der Beobachtung mit den Wärmebildkameras besteht dabei der Vorteil, dass Aufnahmen in der Dunkelheit stattfinden können, so dass die Tiere in ihrem üblichen Verhalten nicht gestört werden (Justus-Liebig-Universität Gießen).

3. Wärmedämmung

Eine gute Wärmedämmung ist einer der entscheidenden Punkte, um eine nachhaltige Nutzung von Gebäuden zu ermöglichen und stellt dabei auch einen wichtigen Aspekt zur Verringerung des vom Menschen hervorgerufenen Treibhauseffektes dar. Aber nicht nur der Effekt des nachhaltigen Nutzens im Hinblick auf die Ressourcenschonung und die geringere Umweltbelastung spielen eine Rolle. Direkt mit nachhaltigem Nutzen hängt die Kosteneinsparung zusammen. Außerdem können durch eine gute Dämmung bauphysikalische Schäden, die durch Oberflächenkondensation und Frost entstehen können, vorgebeugt werden und insgesamt kann die Raumlufttemperatur abgesenkt werden, wobei auf Grund der höheren Oberflächentemperatur die Behaglichkeit für den Menschen dieselbe bleibt. Auch im Sommer trägt eine gute Wärmedämmung ebenfalls zur Behaglichkeit bei, da sie auch einen Schutz gegen die Überhitzung darstellt (vgl. Zelger 2000, S.3).

Zusammenfassend lässt sich also sagen: „Der Verbrauch an Heizenergie wird am Ort seiner Entstehung „eingedämmt“ oder überhaupt überflüssig und das bei einer deutlichen Verbesserung des thermischen Komforts und der bauphysikalischen Sicherheit“ (ebd., S. 3).

In den folgenden Kapiteln wird auf die Grundlagen des Wärmetransports eingegangen und die im Versuch zu bestimmenden Größen, der Wärmedurchgangskoeffizient U und die Wärmeleitfähigkeit ʎ, vorgestellt.

3.1 Grundlagen des Wärmetransports

Ein System, in dem unterschiedliche Temperaturniveaus vorliegen, ist stets bestrebt dieses Temperaturgefälle auszugleichen. Dabei findet der Wärmeübergang immer vom Zustand der höheren Temperatur zum Zustand einer niedrigeren Temperatur statt. Damit ist die Bewegungsrichtung bzw. der Transport grundsätzlich vorgegeben (vgl. Schild und Willems 2011, S. 36).

$$\dot{Q}_{Gesamt} = \dot{Q}_{Leitung} + \dot{Q}_{Strömung} + \dot{Q}_{Strahlung} \qquad (6)$$

Wie genau der Wärmetransport aber stattfindet hängt vom Medium, in dem diese übertragen wird, ab. Hierbei wird üblicherweise zwischen drei verschiedenen Transportmechanismen, der Wärmeleitung, der Wärmeströmung und der Wärmestrahlung unterschieden. Im Normalfall treten die drei Transportmechanismen gemeinsam auf, jedoch ist der Beitrag zum Gesamt-Wärmestrom dabei oft sehr unterschiedlich (Freymuth et al. 2002, S. 112).

Die drei genannten Arten des Wärmetransports sind also alle drei wichtig für den Versuchsaufbau und werden deshalb im Weiteren näher erläutert.

3.1.1 Wärmeleitung

Dieser Transportmechanismus ist hauptsächlich in Feststoffen und Flüssigkeiten aber auch in Gasen zu finden. Hierbei kann es sich sowohl um die Wärmeleitung innerhalb eines Materials, als auch um die Wärmeübertragung zwischen unterschiedlichen Materialien, die in stofflichem Kontakt zueinander stehen, handeln.

Bei diesem Vorgang wird die Wärmeenergie von der höheren zur tieferen Energie durch ruhende Flüssigkeiten, Festkörper und auch ruhende Gase geleitet. Dabei wird durch verschiedene Kopplungsmechanismen die Bewegungsenergie der Moleküle übertragen (vgl. Häupl 2008, S.63).

Solch eine Wärmeleitung findet auch in einem Wandaufbau statt und kann durch unterschiedliche Messungen quantifiziert werden. Dabei muss zwischen zwei Wärmeleitvorgängen unterschieden werden, dem stationären Wärmeleitvorgang, der in einem zeitlich konstanten Temperaturfeld vorliegt und dem instationären Wärmeleitvorgang, der in einem zeitlich veränderlichem Temperaturfeld vorliegt. Im Folgenden sollen beide Fälle näher betrachtet werden, wobei für die weitergehenden Berechnungen des Wärmehauses nur die stationäre Wärmeleitung eine Rolle spielt (Freymuth et al. 2002, S. 112).

3.1.1.1 Stationäre Wärmeleitung

Die stationäre Wärmeleitung liegt also dann vor, wenn sowohl das Temperaturgefälle als auch die Treibkraft für den Wärmetransport konstant bleibt. Dabei wird dem System ein konstanter Wärmestrom $\dot{Q}$ zugeführt und abgeführt. Daher muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass der betrachtete Baustoff keine Wärme speichert. Die folgenden schematischen Darstellungen in Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen einen möglichen Temperaturverlauf

T in einem ebenen Wandaufbau unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit λ (vgl. Häupl 2008, S. 70). λ ist eine materialspezifische Konstante, auf welche im Kapitel 3.3 näher eingegangen wird.

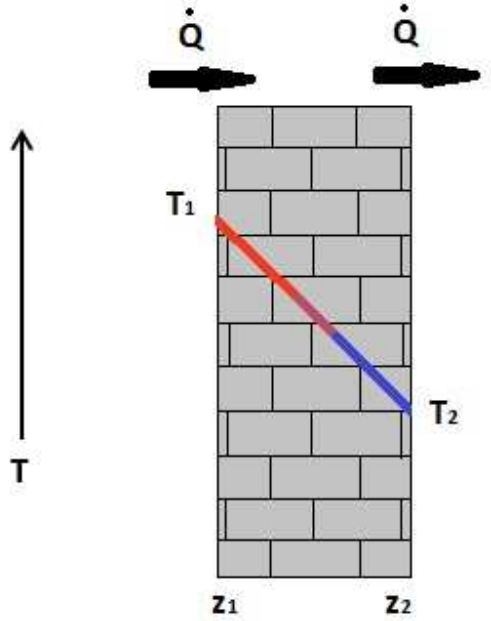


Abbildung 10: Temperaturverlauf in einer einschichtigen, ebenen Wand unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ (nach Häupl 2008, S. 71).

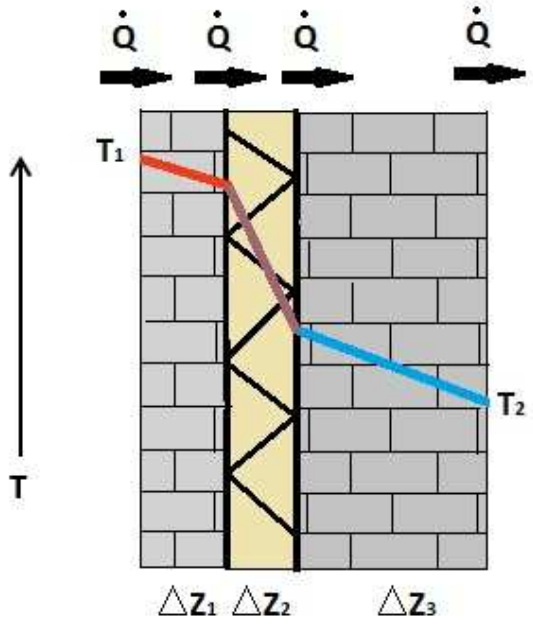


Abbildung 11; Temperaturverlauf in einer mehrschichtigen, ebenen Wand unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ (nach Häupl 2008, S. 71).

$\dot{Q}$ stellt hierbei den Wärmestrom und Δ z die Wanddicke dar. Bei Betrachtung der schematischen Zeichnung eines mehrschichtigen Wandaufbaus wird deutlich, dass der Wärmestrom durch jede Wandschicht gleich bleibt, die Temperatur dagegen innerhalb eines Materials konstant abfällt. Das gilt aber nur für einen ebenen Wandaufbau, in dem die beiden Kontaktflächen (die Außenwand und die Innenwand) gleich groß sind. Der Wärmestrom ist der Quotient der Wärmemenge Q und der Zeit t:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \qquad (7)$$

mit:

$\dot{Q}$:	Wärmestrom
Q:	Wärmemenge
t:	Zeit

(vgl. Schild und Willems 2011, S. 40).

Dieser Wärmestrom wird, für den Fall einer ebenen Wand der Dicke Δ z und dem Strömungsquerschnitt A, mit Hilfe der 1. Fouriergleichung, welche eine allgemeine Beziehung zwischen dem Wärmestrom und der Temperaturdifferenz Δ T darstellt, abgeleitet:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\Delta z} \cdot A \cdot (\Delta T) \qquad (8)$$

mit:

$\dot{Q}$: Wärmestrom
ʎ: Wellenlänge [µm]
A: Strömungsquerschnitt
ΔT: absolute Temperatur T [K] = 273,15 + θ [°C]

(vgl. Böckh und Wetzel 2014, S.18)

Mit der Wärmeleitung können Werkstoffe als gute oder schlechte Dämmstoffe qualifiziert werden.
„Gute Wärmeleiter (schlechte Dämmstoffe): Metalle, schwere Massivbaustoffe, Wasser Schlechte Wärmeleiter (gute Dämmstoffe): Luft, Dämmstoffe aus Holzwolle, Kork, Schaumkunststoff oder Schaumglas“ (Lohmeyer, Gottfried C. O. et al. 2008, S. 59).

3.1.1.2 Instationäre Wärmeleitung

Instationäre Wärmeleitvorgänge treten im Gegensatz zu den stationären Wärmeleitvorgängen auf, wenn das Temperaturgefälle nicht konstant ist und damit auch der Wärmestrom zeitlich nicht mehr konstant ist. Dies bedeutet, dass von der Wand nicht mehr genauso viel Wärme aufgenommen wie abgegeben wird. Dabei kann es zu einer Wärmespeicherung in der Wand kommt. Zu einer instationären Wärmeleitung kann es außerdem kommen, wenn ein Werkstoff aufgeheizt oder abgekühlt wird, sowie auch bei periodisch auftretenden Temperaturänderungen. Der Wärmestrom in z-Richtung durch das Volumen kann an der Stelle z mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta z} \qquad (9)$$

mit:

$\dot{Q}$: Wärmestrom
ʎ: Wellenlänge [µm]
A: Strömungsquerschnitt
ΔT: absolute Temperatur T [K] = 273,15 + θ [°C]
Δz: Wandstärke

(vgl. Böckh und Wetzel 2014, S. 50).

Dabei kann die Änderung des Wärmestroms in einem Volumenelement mit Hilfe folgender Gleichung berechnet werden:

$$\delta \dot{Q} x = -\rho \cdot A \cdot \Delta z \cdot c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} \qquad (10)$$

mit:
$\dot{Q}$: Wärmestrom
ρ: Dichte des Werkstoffes
A: Strömungsquerschnitt
Δz: Wandstärke
c_p: spezifische Wärmekapazität
ΔT: Temperaturdifferent in [K] = 273,15 + θ [°C]
Δt: Zeitraum

Oft werden die Stoffkonstanten Dichte, Wärmekapizität und die Wärmeleitfähigkeit zu der Temperaturleitzahl a zusammengefasst:

$$a = -\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \qquad (11)$$

mit:
a: Temperaturleitzahl
ρ: Dichte des Werkstoffes
c_p: spezifische Wärmekapazität

Die Temperaturleitzahl a ist temperaturabhängig und kann aus Tabellen entnommen werden. Anhand der Gleichung 8 wird deutlich, dass die Temperaturleitfähigkeit die Größe, die den zeitlichen Verlauf einer Erwärmung oder Abkühlung eines Stoffes bestimmt (vgl. ebd., S. 51).

3.1.2 Wärmeströmung/Wärmekonvektion

Liegen nicht mehr ruhende Stoffe vor, wie es in der reinen Wärmeleitung der Fall ist, sondern sich bewegende Flüssigkeiten und Gase, so findet der Transport der Wärme nicht mehr nur über die Wärmeleitung statt, sondern hauptsächlich durch die Wärmeströmung (Bogusch und Duzia 2012, S. 45). Dabei wird Wärme von einem vorbei strömenden Medium an ein Körper übertragen oder die Wärme wird von einem Körper auf ein vorbeiströmendes Medium übertragen. Dabei hängt die Menge an Wärme (Wärmestrom) die übertragen wird von dem Temperaturunterschied zwischen dem Körper und dem vorbeiströmendem Medium, der Strömungsgeschwindigkeit sowie der Oberflächenrauhigkeit ab.

Dieser Zusammenhang wird auch mit Hilfe des Newton'schen Ansatzes deutlich:

$$q = h_k \cdot (T_S - T_U) \qquad (12)$$

mit:
T_S: Temperatur der Oberfläche
T_U: Temperatur des strömenden Mediums
h_k: konvektiver Wämreübergangskoeffizient

(vgl. Häupl und Willems 2013, S. 14).

Hierbei wird zwischen zwei Arten der Konvektion, der natürlichen Konvektion und der erzwungenen Konvektion, unterschieden. Eine natürliche Strömung liegt dann vor, wenn örtliche Temperatur– oder Dichteunterschiede vorhanden sind. Eine erzwungene Konvektion tritt dagegen auf, wenn mechanische Hilfsmittel, wie z.B. eine Pumpe eingesetzt werden (vgl. Freymuth et al. 2002, S. 114). Im vorliegenden Versuch handelt es sich um eine freie Konvektion. Bei einer freien Konvektion erfolgt die Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an einer vertikalen Wand mit folgender Gleichung:

$$h_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{H} \qquad (13)$$

mit:
Nu: Nusselt-Zahl
λ: Wärmeleitfähigkeit der Luft (bei 1 bar und 30 °C 0,0265 W/(mK)
H: Höhe der Wand

Die Nusselt-Zahl gibt dabei an um das wieviel Fache der Wärmeübergang eines strömenden Mediums höher ist als der eines ruhenden Mediums und wird mit folgender Gleichung bestimmt:

$$Nu = \left[0{,}825 + 0{,}387 \cdot Ra^{0{,}167}\left[1 + \left(\frac{0{,}492}{Pr}\right)^{0{,}563}\right]^{-0{,}296}\right]^2 \qquad (14)$$

mit:
Ra: Rayleigh-Zahl
Pr: Prandtl-Zahl

Die Prandtl-Zahl gibt das Verhältnis zwischen der kinematischen Zähigkeit zur Temperaturleitfähigkeit an und wird bei einem Luftdruck von p = 1 bar und beispielsweise einer Temperatur von 30 °C mit Pr = 0,71 angegeben.

Die Rayleigh-Zahl wird mit Gleichung 15 bestimmt:

$$Ra = \frac{g \cdot \Delta T \cdot H^3 \cdot Pr}{(T_U + 273) \cdot v^2} \qquad (15)$$

mit:
T_S: Temperatur unbeeinflussten Umgebung
T_U: Wandtemperatur
Pr: Prandtl-Zahl
ΔT: Temperaturdifferenz
H: Höhe der Wand
g: Erdbeschleunigung
v: kinematische Viskosität (bei 1 bar und 30 °C $v = 16{,}305 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$

Vereinfacht kann der konvektive Wärmeübergangskoeffizient zwischen Bauteil und strömender Luft bei einer üblichen Raumhöhe in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz auch über die Funktion bestimmt werden (vgl. Häupl und Willems 2013, S. 14 ff.).

$$h_k = 1{,}6 \cdot \Delta T^{0{,}3} \qquad (16)$$

3.1.3 Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung stellt eine besondere Art des Wärmetransports dar, da sie ohne die Beteiligung einer Materie stattfindet. Stattdessen findet sie in Form von elektromagnetischen Wellen statt. Diese Wärmestrahlung ist mit den elektromagnetischen Wellen von sichtbarem Licht identisch. Der einzige Unterschied liegt in der Wellenlänge der Strahlung. Haben wir einen undurchlässigen Gegenstand so kommt es, genau wie mit Lichtstrahlen, zur Wechselwirkung zwischen der elektromagnetischen Strahlung und der Materie. Wie diese Wechselwirkung genau aussieht, hängt von der Oberflächenbeschaffenheit des Gegenstandes ab. Wird ein Körper mit nichtmetallischer Oberfläche betrachten, so wird die elektromagnetische Strahlung stark absorbiert und emittiert, jedoch nur sehr schwach reflektiert. Bei einem Gegenstand mit einer metallisch glänzenden Oberfläche kommt es dagegen zu einer geringen Absorption und Emission, jedoch zu einer starken Reflexion (vgl. Lohmeyer, Gottfried C. O. et al. 2008, S. 59).

Wie viel Strahlungsleistung ein Körper hat, kann mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz berechnet werden:

$$S = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \qquad (17)$$

mit:
T : Temperatur des Körpers
ε: Emissionskoeffizient des Körpers
σ: Stefan- Boltzmann-Konstante

Der Strahlungsaustausch zwischen zwei parallelen Flächen wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$\dot{Q} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{1}{\varepsilon_2}-1} \cdot A_1 \cdot ({T_1}^4 - {T_2}^4) \qquad (18)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient der Strahlung wird dann folgendermaßen berechnet:

$$h_s = \frac{\dot{Q}}{T_1 - T_2 \cdot A_2} \qquad (19)$$

(vgl. Häupl und Willems 2013, S. 24).

3.2 Wärmedurchgangskoeffizient U von Dämmstoffen

Der Wärmedurchgangskoeffizient U ist ein Maß des Wärmedurchgangs durch ein Material oder ein Bauteil, das aus mehreren verschiedenen Materialien aufgebaut ist. Dieser Wärmedurchgang basiert auf der Wärmeleitung durch die Materialschichten und den Wärmeübergang an der Grenzfläche zwischen Wandoberfläche und Luft. Mit dieser Größe wird angegeben, wie viel Energie durch 1 m^2 eines Bauteils bei einer Temperaturdifferenz von 1 K von innen nach außen abgegeben wird. Es ergibt sich also die Einheit W/(m^2 K) für den Wärmedurchgangskoeffizienten U, welche deutlich macht, dass es sich nicht um eine Stoffgröße, sondern vielmehr um eine Bauteilgröße handelt (Zelger 2000, S. 16; Königstein 2009, S. 16). Daraus folgt: „Je kleiner der Wärmedurchgangskoeffizient eines Bauteils ist, desto besser ist die Wärmedämmung des Bauteils“ (Zelger 2000, S. 16).

Häufig ist auch die Rede vom Wärmedurchlasswiderstand R, der direkt mit dem Wärmedurchlasskoeffizient verknüpft ist, denn es gilt:

$$U = \frac{1}{R_{Gesamt}} \qquad (20)$$

Dieser lässt sich mit Hilfe der Materialdicke und der Wärmeleitfähigkeit (siehe Kapitel 3.3) eines Materials berechnen:

$$R_W = \frac{d}{\lambda} \qquad (21)$$

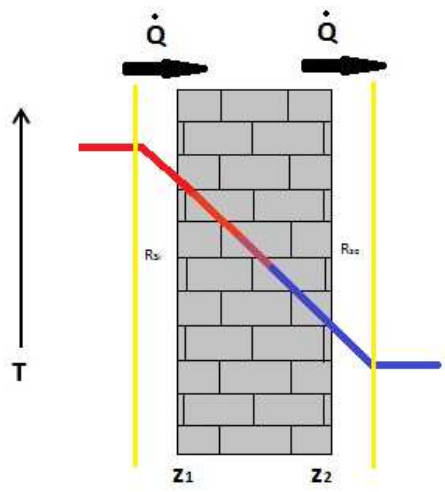


Abbildung 12: Temperaturverlauf in einer einschichtigen, ebenen Wand unter Einbezug der Wärmedurchlass-widerstände zwischen Luft und Wand (nach Häupl 2008, S. 71).

Wie bereits erwähnt, hängt hierbei der Wärmedurchgangskoeffizient bzw. der Wärme-durchlasswiderstand nicht nur von den einzelnen Schichten der Wand, sondern auch von den Wärme-übergangswiderständen, innen R_{Si} und außen R_{Se}, über die Luft ab. Dabei sind diese abhängig von dem Bewegungszustand der Luft, der Geschwindigkeit, sowie der Oberflächenbeschaffenheit der Wand und vielem weiteren. Dadurch kommt es zu einer Erweiterung der Abbildung 10 und 11, die in Abbildung 12 exemplarisch gezeigt ist (Bogusch und Duzia 2012, S. 33 ff.).

Häufig wird in der Literatur auch von dem Wärmeübergangskoeffizienten innen h_i und außen h_a gesprochen. Dieser beschreibt die Wärmemenge, die an einer 1 m^2 großen Fläche bei einem Temperaturunterschied von 1 K pro Sekunde übergeht. Dabei besteht folgender Zusammenhang:

$$h_i = \frac{1}{R_{Si}} \quad \text{bzw.} \quad h_a = \frac{1}{R_{Se}} \qquad (22 \text{ und } 23)$$

(vgl. Schild und Willems 2011, S. 59)

Damit ergibt sich ein Gesamtwiderstand von:

$$R_{Gesamt} = R_i + R_W + R_a = \frac{1}{h_i} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_a} \qquad (24)$$

Der genannte Transport von einer Wärmemenge durch das Material unter Einbezug der Übergänge zwischen Wandoberfläche und Luft wird durch die Wärmestromdichte $\dot{q}$ beschrieben, welche folgendermaßen definiert ist:

$$\dot{q} = U\,(\theta_{Li} - \theta_{La}) \qquad (25)$$

Nach der DIN EN ISO 6946 werden die erfahrungsgemäß durchschnittlichen Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten angegeben. Diese sind in der unten stehenden Abbildung 13 zusammengetragen.

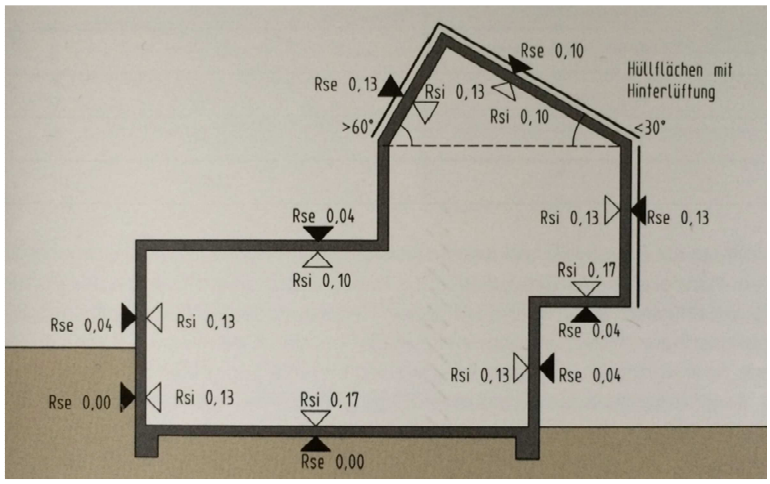


Abbildung 13: Übersicht der konventionellen Wärmeübergangswiderstände nach DIN EN ISO 6946 (Bogusch und Duzia 2012, S. 35).

Diese angegebenen Werte für den Wärmedurchgangskoeffizienten h setzen sich zusammen aus der strahlungsbedingten Wärmeübergangskoeffizienten h_s und der durch Konvektion bedingten Wärmeübergangskoeffizienten h_k zusammen.

$$h = h_k + h_S \qquad (26)$$

(vgl. Häupl und Willems 2013, S. 26).

Im vorgestellten Versuch sind diese Werte aber nicht direkt übertragbar, denn es liegen im Innenraum weitaus höhere Temperaturen vor, als das bei einem Gebäude üblicherweise der Fall ist. Zusätzlich handelt es sich um einen sehr kleinen Raum, weshalb der Konvektionsfaktor innen weitaus größer sein wird. Deshalb werden die Werte h_i und h_a im Auswertungsteil für das Thermohaus neu berechnet.

Der Wärmeübergangskoeffizient h_i und h_a hängt folgendermaßen mit der übertragenen Wärmestromdichte zusammen:

$$\dot{q} = h_i(\theta_{Li} - \theta_{Wi}) \quad \text{bzw.} \quad \dot{q} = h_a(\theta_{Wa} - \theta_{La}) \qquad (27 \text{ und } 28)$$

Wird dies in Gleichung 17 eingesetzt, ergibt sich dementsprechend:

$$U = \frac{\dot{q}}{\theta Li - \theta La} \qquad (29)$$

Und letztendlich, durch Einsetzten von Gleichung 19 kann der U-Wert mit Hilfe der ermittelten Temperaturdifferenzen berechnet werden.

$$U = h_a \frac{(\theta_{Wa} - \theta_{La})}{(\theta_{Li} - \theta_{La})} \qquad (30)$$

Im folgenden Versuch ist es sinnvoll mit dem äußeren Wärmeübergang zu rechnen, da innen auf Grund der Heizung ein starker Wärmestrom entsteht, und der Wert h_i somit nicht bekannt ist (vgl. Schild und Willems 2011, S. 40).

3.3 Wärmeleitfähigkeit ʎ von Dämmstoffen

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine Stoffgröße und beschreibt dabei wie viel Energie in Form von Wärme, die durch ein Material pro Sekunde bei einer Materialdicke von einem Meter, bei einem Temperaturunterschied von einem Kelvin hindurchgeht. Es ergibt sich hierbei die Einheit für die Wärmeleitfähigkeit ʎ von $\frac{J}{smK}$ oder auch $\frac{W}{mK}$ (vgl. Königstein 2009, S. 15).

Der genannte Transport von einer Wärmemenge durch das Material wird durch die Wärmestromdichte $\dot{q}$ beschrieben, welche folgendermaßen definiert ist:

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{d}(\theta_{Wi} - \theta_{Wa}) \qquad (31)$$

Aufgelöst nach der Wärmeleitfähigkeit λ ergibt sich:

$$\lambda = \frac{d \cdot \dot{q}}{(\theta_{Wi} - \theta_{Wa})} \qquad (32)$$

Wird nun der Wärmestrom für den äußeren Wärmeübergang in die Formel 20 eingesetzt ergibt sich:

$$\lambda = h_a \frac{(\theta_{Wa} - \theta_{La})}{(\theta_{Wi} - \theta_{Wa})} d \qquad (33)$$

Im Bauwesen wird ein möglichst kleiner Wert für ʎ angestrebt, da dies bedeutet, dass möglichst wenig Wärme über die Wände entweicht, also ein geringer Wärmestrom durch die Wände hindurch vorliegt.
In der unten stehenden Tabelle 3 sind einige Werte aus der Literatur zusammengetragen. Luft hat eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit und ist damit ein sehr schlechter Wärmeleiter. Ist also Luft in einen Baustoff eingelagert, so hat er eine bessere Leitfähigkeit, wie wenn keine Luft eingeschlossen wäre. Das ist auch der Grund warum häufig Styropor oder ähnliches eingesetzt wird oder eine Fassade hinterlüftet wird (vgl. Königstein 2009, S. 15).

In Tabelle 3 sind einige Werte für die Wärmeleitfähigkeiten ʎ für Baustoffe zusammengetragen:

Baustoff	**Wärmeleitfähigkeit in W/mK**
Nadelholz	0,13
Porosierter Ziegelstein (580 kg/m^3)	0,09
Kalksandstein (1000 kg/ m^3)	0,50
Stahlbeton	2,00
Nadelholz	0,13
Polystyrol (EPS)	0,040
Holzweichfaser	0,04

Tabelle 3: ausgewählte Baustoffe mit der dazugehörigen Wärmeleitfähigkeit (vgl. Königstein 2009, S. 19).

3.3.1 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen

Inzwischen gibt es eine Vielzahl an Verfahren, um die Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen zu ermitteln. Im Rahmen dieser Arbeit soll aber nur eine der möglichen Verfahren vorgestellt werden. Dabei handelt es sich um das Ein- oder Zwei-Plattenverfahren, welches auch durch die DIN 52612 definiert wird.

Dieses Messverfahren wird im stationären Zustand durchgeführt. Eine Einplattenapparatur besteht aus einer Heiz- und einer Kühlplatte zwischen die eine Probe platziert wird. Es wird über die Heiz- bzw. Kühlplatte eine definierte Temperaturdifferenz eingestellt und dabei der Wärmestrom gemessen, welcher aus der zugeführten elektrischen Leistung der Heizplatte ermittelt wird. Dagegen besteht eine Zweiplattenapparatur aus zwei Kühlplatten und einer in der Mitte angebrachten Heizplatte. Zwischen die Platten wird jeweils ein Probenkörper gelegt. Dabei ist es wichtig, dass die beiden Probenkörper von Größe und Beschaffenheit möglichst identisch sind. Es wird ebenso der Wärmestrom über die zugeführte Leistung der Heizplatte berechnet. Dieser muss aber durch zwei geteilt werden, da sich der Wärmestrom auf die beiden Proben aufteilt (vgl. Rhena Wulf 2009, S.13).

3.4 Wärmebrücken

„Wärmebrücken sind örtlich begrenzte Bereiche in raumabschließenden Bauteilen, an denen ein erhöhter Wärmefluss von der wärmeren zur weniger warmen Seite hin auftritt“ (Fouad und Richter 2012, S. 83).

Dabei wird üblicherweise in der Bauphysik zwischen zwei Arten von Wärmebrücken unterschieden:

- Stoffbedingte Wärmebrücken: Treten auf beim Einsatz von Materialien mit deutlichen Unterschieden in der Wärmeleitfähigkeit.
- Geometrische Wärmebrücken: Anfällig für solche Wärmebrücken sind beispielsweise die Eckbereiche eines Objektes. Hierbei ist die Außenfläche sehr viel größer als die Innenfläche, was zu einem höheren Wärmedurchgang führt und damit häufig zu Wärmebrücken. Mit geeigneten Maßnahmen sind aber diese Wärmebrücken auch weitgehend vermeidbar.

Mit der Thermografie können diese Schwachstellen berührungslos aufgedeckt werden. Dabei ist bei der Detektion von Wärmebrücken wichtig einschätzen zu können, ob eine Wärmebrücke schadenverursachend ist oder nicht, denn nicht alle Wärmebrücken führen zu einem Schaden.

Eine schadensverursachende Wärmebrücke wird durch eine Verringerung der Oberflächentemperatur oder durch die Gefahr einer Schimmelpilzbildung charakterisiert (vgl. Fouad und Richter 2012, S. 83 ff.; Schild und Willems 2011, S. 182).

3.5 Aktuelle Standards, Richtlinien, DIN Normen

Durch die EnEV-Standards 2014 (Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik in Gebäuden) werden energetische Mindeststandards für Wohn- und Nichtwohngebäude vorgegeben. Dabei gilt die EnEV für fast alle Gebäude, die beheizt oder klimatisiert werden. Es wird zwischen Standards von Neubauten und bestehenden Bauten unterschieden. Die Mindeststandards für bestehende Gebäude treten dann in Kraft, wenn ohnehin eine Erneuerung oder Modernisierung geplant ist, z.B. eine Erneuerung der Fassade oder der Austausch von Fenstern. In Tabelle 4 sind einige Anforderungen für Außenbauteile aufgelistet.

Bauteile	U-Wert in W/(m²K)
Außenwand	0,24
Fenster	1,30
Flachdach	0,20
Dachschrägen, Steildächer	0,24

Tabelle 4: ausgewählte Baustoffe mit der dazugehörigen Wärmeleitfähigkeit (vgl. Königstein 2009, S. 19).

Für Neubauten wird ein maximaler Jahres-Primärenergieverbrauch vorgeschrieben, der mit Hilfe der Angaben in DIN V 18599 berechnet wird. Dabei werden die energetischen Anforderungen für Neubauten ab dem Jahre 2016 um 25% erhöht, sowie der Dämmstandards um ca. 20 %. Ziel ist es bis zum Jahre 2021 die Standards für die Niedrigenergiehaus (NEH) europaweit zu erreichen, da diese eine sehr gute Gesamteffizienz aufweisen. Die Anforderungen für ein Niedrigenergiehaus als auch die Standards für ein Passivhaus (PH), welches eine noch bessere Gebäudeeffizienz aufweist, werden in Tabelle 5 aufgelistet.

Bauteil	U-Wert in W/(m²K) für NEH	U-Wert in W/(m²K) für PH
Außenwand	0,20	0,15
Fenster	< 1,5	< 0,8
Dach	< 0,2	< 0,15

Tabelle 5: U-Wert Standards für ein Niedrigenergiehaus (NEH) und ein Passivhaus (PH)

Zusätzlich wird mit der neuen EnEV verbindlich, dass jeder Verkäufer und Vermieter einen Energieausweis erstellen und den potentiellen Mietern und Käufern vorzeigen muss (Tuschinski, 2013, S.62).

3.6 Untersuchung an bestehenden und unbekannten Wandaufbauten

Um bauthermografische Untersuchungen an unbekannte Wandaufbauten durchführen zu können, sind neben einem fachkundigen Personal und einer geeigneten Wärmebildkamera noch weitere Faktoren wichtig, welche in Kapitel 2.3.1 bereits aufgeführt wurden.

Üblicherweise wird, wie es auch in dem folgenden Versuchsaufbau verwirklicht wurde, die Innentemperatur durch einen Temperaturfühler oder einen Temperaturlogger aufgenommen. Auch die Wand-Innentemperatur wird üblicherweise mit Temperaturfühlern aufgenommen. Die eigentliche Messung mit der Wärmebildkamera wird bei Außentemperaturen von 9 bis 24 °C durchgeführt, bei Windstille und ohne direkte Sonneneinstrahlung durchgeführt. Deshalb werden die Messungen oft in der Nacht durchgeführt. Außerdem ist eine korrekte Messungen nur möglich, wenn es nicht nebelig ist und kein Regen oder Schnee fällt, da es hierbei sonst zu Streuungseffekten kommen würde (vgl. Fouad und Richter 2012, S. 163; Schuster und Kolobrodov 2000, S. 302).

Es hat sich bewährt den Temperaturfühler mit Hilfe von Knetmasse an der Wand zu befestigen. Dazu wurde im Jahre 2006 in einer Patentanmeldung folgendes festgehalten: „Die Knetmasse dient dazu, die aktive Stelle des Thermoelements auf der Wandoberfläche zu halten, den Kontakt zwischen dem Thermoelement und der Wandoberfläche, insbesondere auch bei schwierig zu vermessenden Wandoberflächen wie z. B. Rauputzen, sicherzustellen und so für einen guten Wärmeübergang zwischen der Wandoberfläche und dem Thermoelement zu sorgen. Weiterhin schützt die Knetmasse die Kontaktstelle vor

Temperaturschwankungen, beispielsweise durch Konvektion einer in der Nähe befindlichen Heizung. Knetmasse hat weiterhin die Vorteile, dass sie dauerelastisch ist und nicht austrocknet, so dass sie oft wieder verwendet werden kann“ (Rombach 2006, S.3).

4. Versuchsentwicklung

In den folgenden Kapiteln wird die Vorgehensweise bei der Entwicklung des Versuchs zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und des Wärmedurchgangskoeffizenten von unterschiedlichen Wandaufbauten mit Hilfe der Wärmebildkamera erläutert. Zunächst wird das bereits bestehende Thermohaus und die Messung an diesem vorgestellt. Anschließend wird der Versuchsaufbau des neuen Thermohauses erläutert, sowie die Messungen und Ergebnisse vorgestellt.

4.1 Das PHYWE Thermohaus

Zunächst werden einige Versuche zur Temperaturmessung mit der Wärmebildkamera an dem bereits vorhandenen Thermohaus von PHYWE durchgeführt. In den folgenden Kapiteln wird zunächst der Aufbau des PHYWE Thermohauses und dessen Funktionsweise erläutert. Danach werden die Messergebnisse vorgestellt, die bei der Messung mit der Wärmebildkamera am PHYWE Thermohaus ermittelt werden.

4.1.1 Aufbau und Funktionsweise des PHYWE Thermohauses

Das PHYWE-Thermohaus ist ein quadratischer Würfel, der überwiegend aus Holz mit einer Beschichtung gebaut ist und der in allen vier Seitenwänden eine quadratische Öffnung besitzt. In diese Öffnungen können unterschiedliche Messwände eingesetzt werden. In jeder Ecke befindet sich ein Eckpfeiler aus Holz, in welchem sich jeweils ein schaumstoffisolierter Durchbruch befindet, durch den die Temperaturfühler in den Innenraum des Thermohauses geführt werden können. In Abbildung 14 ist eine Aufsicht und ein Schnitt durch das Thermohaus zu sehen. Für die Messungen wird das Thermohaus an Wand 1 mit einer 1 cm dicken Buchenholzmesswand, an Wand 2 mit einem Isolierglas, an Wand 3 mit einer 2 cm dicken Expandierten Polystyrol-Platte (EPS) und an Wand 4 mit einer 2 cm dicken Buchenplatte und einer 2 cm dicken EPS-Platte bestückt.

Beheizt wird das Thermohaus von innen, indem eine über eine Lampenfassung angeschlossene Glühlampe (60 Watt/230 V), die von einem schwarzen Metallblech abgedeckt wird. Um die Innentemperatur zu regeln, wird eine zusätzliche elektronische Heizungsregelung benötigt. Hierfür wird ein Thermofühler im Innenraum des Thermohauses installiert, welcher über Diodenbuchsen mit der Heizungsregelung verbunden wird. Der

Netzanschluss der Glühlampe im Haus wird mit der Heizungsregelung verbunden, so dass die Lampe immer dann ausgeschaltet wird, wenn die eingestellte Maximaltemperatur erreicht wird und dann wieder automatisch eingeschaltet, wenn die Temperatur unter diese Temperatur fällt.

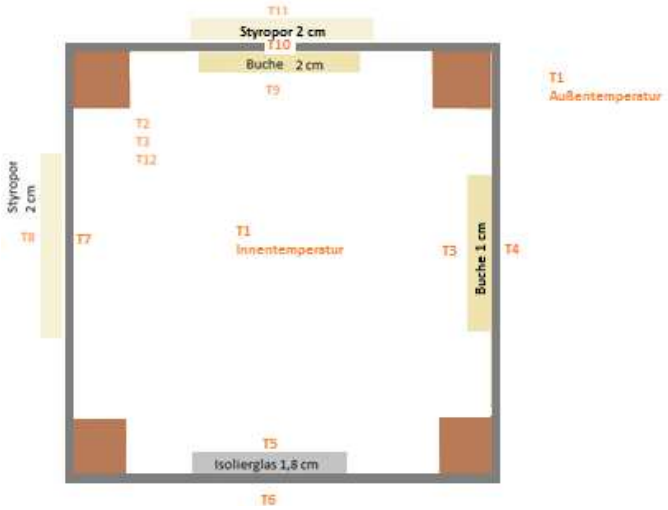


Abbildung 14: Grundriss PHYWE-Themohaus

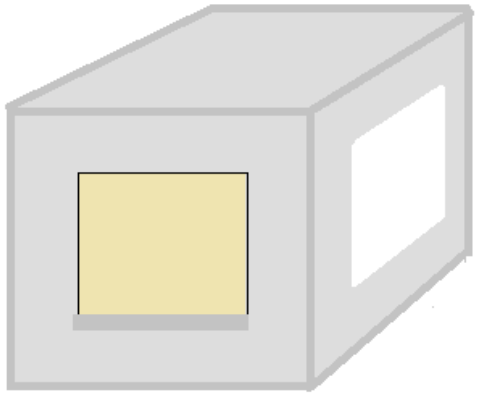


Abbildung 15: Außenansicht PHYWE-Thermohaus.

Die Messung der Temperaturen erfolgt mit 16 NiCr-Ni Thermoelementen, die über ein Datenlogger-System namens CompactDAQ der Firma National Instruments mit dem PC verbunden wird. Die eingehenden Messdaten werden mit Hilfe eines, durch ein mit Lab View programmiertes Programm erfasst, dargestellt und gespeichert. Nach der Messung werden die Messwerte in einer externen Datei abgelegt, in der sie für weitergehende Auswertungen, z.B. mit Hilfe von Microsoft Excel, importiert werden können.

Zunächst muss das Thermohaus über die Glühlampe mit Heizmodul zwei Stunden geheizt werden, so dass sich ein stationärer Zustand einstellt. Dann können die eigentlichen Messwerte aufgenommen werden. Es hat sich eine Messwertaufnahme von 10 - 15 Minuten bewährt, damit kleinere Temperaturschwankungen bei der Auswertung keine Auswirkung haben.

4.1.2 Messaufnahme mit der Wärmebildkamera am PHYWE Thermohaus

Der vorliegende Versuch wird zunächst so umgestaltet, dass nur noch die Innenwandtemperaturen, sowie die Innen- und Außentemperaturen, mit Hilfe der Thermoelemente erfasst werden. Die Außenwandtemperaturen werden dagegen mit der Wärmebildkamera aufgenommen. Eine Messaufnahme mit der Wärmebildkamera bietet sich in diesem Versuch besonders an, da hierbei um eine sehr schnelle, unkomplizierte Messmethode handelt. Zusätzlich bietet es sich, damit die Versuchsdurchführenden die Wärmebildkamera und deren Bedienung kennen lernen und selbst durchführen an, da diese nicht nur in der Bauthermografie eine immer wichtiger werdende Rolle spielt.

Messungen am Thermohaus von PHYWE

Zunächst werden einige Messungen mit der Wärmebildkamera an dem PHYWE Thermohaus durchgeführt, um die Funktionsweise der Kamera besser kennen zu lernen und vor allem, um heraus zu finden, ob bestimmte Aspekte beim Bau des neuen Thermohauses von Relevanz sind und berücksichtigt werden müssen. Im Folgenden werden hierzu Messreihen vorgestellt.

Kalibieren der Kamera

Bei jeder Messung muss die reflektierte Temperatur ermittelt und in der Kamera eingegeben werden. Außerdem muss der Emissionsgrad jedes Bauteils, dessen Oberflächentemperatur gemessen werden soll, ermittelt werden oder es können Werte aus der Literatur verwendet werden. Jedoch ist die Übernahme der Literaturwerte nicht immer vorteilhaft, denn die Werte für den Emissionsgrad sind Wellenlängen, die temperaturabhängig und nicht bei jedem Objekt gleich sind, obwohl es aus demselben Material besteht.

Die reflektierte Temperatur wird, wie in der Bedienungsanleitung der Wärmebildkamera angegeben, durchgeführt.

Hierzu wird eine, auf einem Karton aufgeklebte, Alufolie benötigt. Diese wird zunächst zusammen geknüllt, danach wieder glatt gestreift und dann auf einem Karton befestigt.

Dieser Aufbau wird nun an einer Wand des Häuschens platziert und der Emissionsgrad im Menü der Kamera auf 1,0 gestellt. Die Temperatur der Alufolie wird gemessen, festgehalten und im Menü der Kamera unter reflektierte Temperatur eingetragen.

Im Falle dieses Laborversuchs ist es relativ einfach den Emissionsgrad der Materialien zu bestimmen. Hierfür wird die Temperatur der Oberfläche mit Hilfe eines Thermoelements aufgenommen und der Emissionsgrad in den Einstellungen der Kamera so lange verändert, bis sie die richtige Temperatur anzeigt.

Diese beiden Vorgehensweisen werden für die Durchführgen der Messung am neuen Thermohaus übertragen.

Vergleich der mit dem Thermofühler gemessenen Werte und der mit der Kamera ermittelten Werte

Zunächst wird überprüft ob die Werte, die mit der Kamera und mit den Messfühler ermittelten werden, übereinstimmen und wie zuverlässig diese sind. Hierzu wird die Wand, an der die Buchenholzplatte sowie die EPS-Platte angebracht sind, sowohl mit der Wärmebildkamera als auch mit den Thermofühlern vermessen.

Messaufnahme	Temperatur in °C Wärmebildkamera	Temperatur in °C Thermofühler
1	23,6	23,5
2	23,8	23,9
3	23,7	23,9
4	23,9	24
5	24,2	24
6	24,1	23,9
7	24,2	24,2
8	24,7	24,4
9	24,6	24,6
10	25	24,9
11	25	24,8
12	25,4	25,1
13	25,2	25

Tabelle 6:Messwertaufnahme Vergleich Wärmebildkamera und Thermofühler.

Beim Vergleich der beiden gemessenen Temperaturen wird deutlich, dass die Werte nicht immer ganz übereinstimmen. Dies kann unter anderem auf Messfehler der Messgeräte zurückgeführt werden. Außerdem zeigt die Wärmebildkamera nur Messwerte mit einer Nachkommastelle an, weshalb die Abweichungen der Messwerte auf Rundungsfehler der Messapparaturen basieren können. Zusätzlich erfolgt die Messaufnahme mit dem

Thermoelement über das LabVIEW-Programm nur alle 4 Sekunden und die Heizung durch die Glühbirne schwankt beim Heizvorgang innerhalb von 10 Sekunden um einen Wert von bis zu 0,1 - 0,3 °C.

Um die Unsicherheit durch die Schwankungen der Heizung zu verringern, wird eine leicht geänderte Messmethode untersucht. Hierzu wird nicht mehr nur ein Wärmebild aufgenommen, sondern drei Wärmebilder in kurzen Zeitabständen hintereinander aufgenommen. Gleichzeitig werden die Werte über die Aufnahmedauer der Wärmebilder gemittelt. In Tabelle 7 ist exemplarisch eine Messreihe aufgezeigt.

Es ist zu sehen, dass durch diese Methode die Differenzen der beiden Messmethoden verringert werden kann. Trotz den übrig bleibenden kleinen Schwankungen werden diese ermittelten Werte als relativ zuverlässig und genau angesehen, so dass die Messung an dem neuen Thermohaus mithilfe der Wärmebildkamera durchgeführt werden soll.

Messaufnahme	Temperatur in °C Wärmebildkamera	gemittelte Temperatur in °C Wärmebildkamera	gemittelte Temperatur in °C Thermofühler
1	25,9	25,87	26,2
	25,8		
	25,9		
2	26,1	26,17	26,2
	26,2		
	26,2		
3	26,3	26,37	26,3
	26,3		
	26,5		
4	26,3	26,17	26
	26,1		
	26,1		
5	25,9	26,07	25,9
	26		
	26,3		
6	26,5	26,5	26,3
	26,5		
	26,5		
7	26,2	26,27	26
	26,3		
	26,3		

Tabelle 7: Vergleich der Mittelwerte von drei Wärmebilder, die direkt hintereinander aufgenommen.

Überprüfung der Messwerteaufnahme mit der Kamera über eine Zeit von 130 min

Im Folgenden wird überprüft, ob eine Schwankung in der Messwerterfassung mit der Kamera auftritt. Ausgeschlossen werden soll, dass die Kamera sich bei längerer Benutzung aufheizt und es deshalb zur Verfälschung der Messwerte kommt. Hierfür wird die Kamera in einem Abstand von 50 cm vor der Wand mit den Einsätzen Styropor und Buche platziert

und alle 10 Minuten wird eine Aufnahme gemacht. Die dabei bestimmte Außentemperatur der Wand wurde mit der des Thermofühlers verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 eingetragen.

Messaufnahme	Temperatur in °C Wärmebildkamera	Temperatur in °C Thermofühler
1	23,3	23,4
2	23,5	23,5
3	23,8	23,9
4	23,7	23,8
5	23,9	24
6	24,2	24,1
7	24,1	24
8	24,2	24,2
9	24,7	24,5
10	24,6	24,6
11	25	24,9
12	25	24,8
13	25,4	25,1
14	25,2	25,2

Tabelle 8: Vergleich der Werte gemessen mit der Wärmebild-kamera und dem Thermofühler über eine Zeit von 130 min.

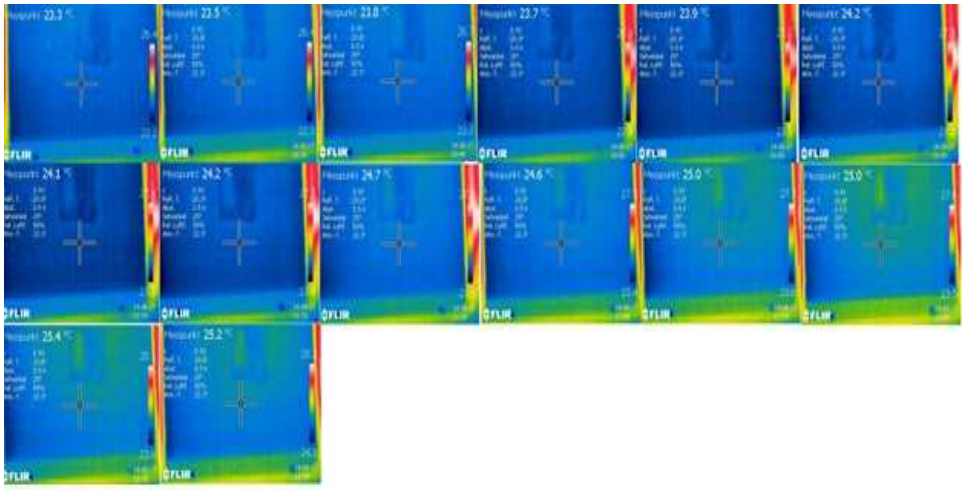


Abbildung 16: Messung mit der Wärmebildkamera alle 10 Minuten über einen Zeitraum von 2 Stunden.

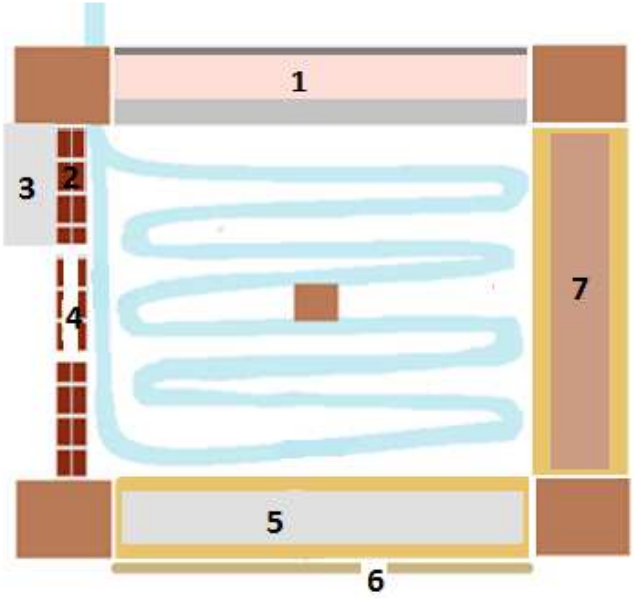
Die Ergebnisse machen deutlich, dass es bei einer Überprüfungsdauer von zwei Stunden zu keinen Messwertverfälschungen kommt. Deshalb kann die Messwerterfassung mit der Wärmebildkamera über eine längere Zeit als stabil eingestuft werden, da nicht von einer längeren Messdauer als zwei Stunden auszugehen ist.

4.2 Versuchsaufbau des neues Thermohaus

Mit dem bisherigen PHYWE Thermohaus ist es möglich einzelne Materialien auf ihre Dämmwirkung zu untersuchen. Die Grundlagen des Wärmetransports, sowie des Wärmedurchgangskoeffizient und der Wärmeleitfähigkeit dieser unterschiedlichen Materialien, können mit Hilfe dieses Versuchs zwar vermittelt und ermittelt werden. Jedoch entsprechen diese Aufbauten nicht den realen Wandaufbauten eines Hauses. Deshalb wird der Versuch erweitert und ein neues Thermohaus mit gängigen Wandaufbauten und Dämmmaterialien wird errichtet. Hierbei kann die Dämmwirkung der unterschiedlichen Wandaufbauten mit unterschiedlichen Dämmmaterialien untersucht werden und auf ihre Qualität hinsichtlich des Wärmeschutzes überprüft werden.

Ziel ist es in diesem Versuch drei häufig eingesetzte Wandaufbauten, welche sowohl aus unterschiedlichen Baustoffen wie auch Dämmstoffen bestehen, vorzustellen.

Deshalb besteht das neue Thermohaus aus den vier verschiedenen gängigen Wandaufbauten: einer einfachen Wand aus Ziegelsteinen, auf die eine Außendämmung nachträglich aufgebracht werden kann, einer Betonwand, die mit einem sehr guten Dämmstoff aus Reosol-Hartschaum gedämmt ist und zweier Holzwänden, die in der Rahmenbauweiße gefertigt und einmal mit Styropor und einmal mit Zellulose gedämmt sind. An den Ecken ist jeweils ein 10 x 10 cm Holzpfeiler montiert, die eine Verbindung ohne Überlappung der vier Wände ermöglichen. Um das Thermohaus möglichst authentisch und stabil aus den einzelnen Bestanteilen aufbauen zu können, werden sowohl die unterschiedlichen Wandaufbauten, wie auch die Eckpfeiler in einem Holzrahmen in Estrich eingegossen. Zwischen den Wandaufbauten und den Eckpfeilern sind Fensterisolationsstreifen eingeklebt, um einen möglichst wärmeverlustfreien Aufbau zu gewährleisten. Die Heizung von innen erfolgt nun nicht mehr, wie in dem PHYWE Thermohaus, über eine Glühlampe, sondern über eine Wasserheizung. Die Messwertaufnahme der Wandinnentemperaturen, der Außentemperatur und der Innentemperatur erfolgt weiterhin über die 16 NiCr-Ni Thermoelementen, dem Datenlogger-System namens CompactDAQ der Firma National Instruments und dem in LabView programmierten Programm. Die Wandaufbauten wie auch die Funktionsweise der Wasserheizung werden in den folgenden Kapiteln erläutert.



1: Estrich/Feinbeton der Firma Baumit (Betonwand: 3cm Dicke); Dämmstoff StarTherm XS022 (Dicke: 7cm); Kleber StarContact (Dicke 7 mm); Nanopor Top (Dünnschichtdeckputz Dicke 2mm)

2: Mauerziegel (Größe: 24x11x6mm)

3: nachträglicher Dämmung aus Expandiertem Polystyrol (EPS) (Dicke: 5 cm)

4: Fensterrahmen aus Holz ; Plexiglas (2 mm dick) als Doppelverglasung Abstand 7 mm

5: Fichte innen und außen 1,5 cm, Dämmung EPS (Dicke 7 cm)

6: Fichte innen und außen 1,5 cm, Dämmung Holzfaserdämmplatte (Dicke 7 cm)

Abbildung 17: Schematischer Aufbau des neuen Thermohauses.

Wand 1: Betonwand mit Resol-Hartschaum-Dämmplatte StarTherm XS 022

Wand 2: Ziegelsteinwand mit Fenster und nachträglicher Dämmung aus Expandiertem Polystyrol (EPS)

Wand 3: Holzwand mit Holzrahmenbauweise gedämmt mit EPS

Wand 4: Holzwand mit Holzrahmenbauweise gedämmt mit Holzfaserplatten

Abbildung 18: Thermohaus Aufbau von oben mit Fußboden-Heizung.

4.2.1 Ziegelwand

Materialien

Mauerziegel der Firma Compact (Größe: 24x11x6mm; Rohdichte: 1816,2 kg/m^3)

Haftspachtel von Decomur

Fensterrahmen aus Holz

Plexiglas (2 mm dick) als Doppelverglasung Abstand 7 mm

Fenstersilikon (Toom)

Maße

Ziegelwand: LxBxD: 36 cm x 22 cm x 2,5 cm

Fensterrahmen: LxB: 9 cm x 11cm

Fenster: LxB: 5,5 cm x 8 cm

Literaturwerte

λ-Wert Ziegelwand: 0,96 W/mK

λ-Wert EPS: 0,04 W/mK

(DIN NORM 4108-4)

Abbildung 19: Frontansicht Ziegelwand mit und ohne zusätzliche Dämmung

Noch bis Mitte des 20 Jahrhunderts war es üblich, dass Wände aus 24 bis 30 cm dicken Vollziegelmauerwerk, welche innen und außen verputzt wurden, gebaut wurden. Eine Ziegelsteinmauer zeichnet sich dadurch aus, dass sie eine hohe Stabilität, eine hohe Wärmespeicherfähigkeit aber nur eine sehr geringe Wärmedämmeigenschaft aufweist (vgl. Gabriel und Endhardt 2010, S.61 ff.).

Der Ziegelstein hat eine sehr lange Tradition, denn bereit um 10 000 vor Christus wurde die grundsätzlichen Techniken, die auch heute noch wichtig für die gebrannte Ziegelherstellung

sind, entwickelt. Dabei wird ein Ziegelstein aus Ton, Sand und anderen Zusatzstoffen hergestellt. Die unterschiedlich eingesetzten Tonzusammensetzungen führen zu unterschiedlichen Farben der Ziegelsteine. Nach Auswahl des Tons wird dieser mit Wasser gemischt, so dass er in Form gebracht werden kann. Heutzutage geschieht dies mit Hilfe von Maschinen und dem Verfahren des Stangenpressens. Anschließend wird der geformte Ziegenstein acht bis 15 Stunden in einem Ofen bei 900 bis 1150 °C gebrannt (vgl. Campbell et al. 2003, S.15).

Zu einer üblichen Bauweise gehört auch der Blockverband, wie er in Abbildung 21 zu sehen ist. Bei dieser veralteten Bauweise ist es empfehlenswert eine nachträgliche Dämmung anzubringen, wodurch der U-Wert, bei einer Außendämmung von ca. 14 cm auf bis zu 0,24 W/m^{2}K möglich ist (vgl. Gabriel und Endhardt 2010 S.61).

Im Versuch wird solch eine im Blockverband gebaute Ziegelwand vermessen. Auf diese Ziegelwand kann auf der Hälfte eine EPS-Dämmung angebracht werden, um den Effekt der nachträglichen Dämmung deutlich zu machen. Hierbei ist es wichtig, dass das Styropor luftdicht angebracht werden kann. Zusätzlich wurde in diese Wand, wie in Abbildung 19 zu sehen ist noch ein Fenster eingebaut.

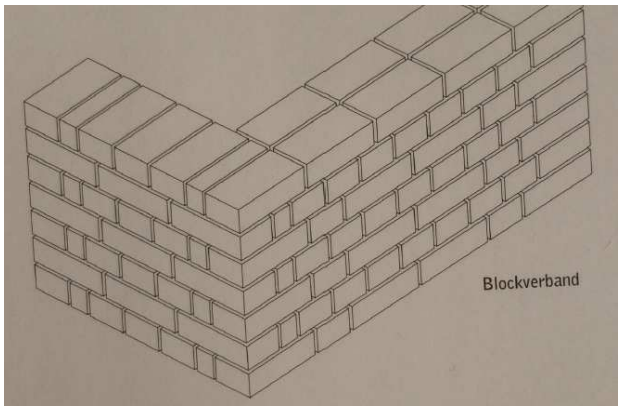


Abbildung 20: Blockverband Ziegelsteinwand (Campbell et al. 2003, S. 305)

4.2.1.1 Fenster

Das Element Fenster stellt in einem Gebäude ein ganz besonderes dar, da dieses das einzige transparente Bauteil in einem Gebäude ist, welches wesentlich zu unserem Wohlbefinden beiträgt. Dabei ist es auch in Bezug auf die Wärmedämmung eine Sonderrolle ein. „Selbst die beste Verglasung bleibt noch hinter einer üblichen Wand zurück. So sind Fenster […] die größten „Energieverlierer“ eines Gebäudes“ (Königstein 2009, S. 73). Dabei ist um ein möglichst dichtes Fenster zu haben, sowohl die Dichtigkeit der Verglasung wie auch die des Rahmens von Bedeutung.

Der U-Wert eines Fensters wird nach der EN ISO 10077-1 mit der Gleichung 34 berechnet:

$$U_W = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + I_g \cdot \psi_g}{A_g + A_f} \qquad (34)$$

mit:

U_w: Wärmedurchgangskoeffizient Fenster
A_g: Fläche Verglasung
A_f: Fläche Rahmen
U_g: Wärmedurchgangskoeffizient Glas
U_f: Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen
I_g: Gesamtumfangslänge der Verglasung
ψ_g: linearer Wärmedurchgangskoeffizient Glasrandbereich (Randverbund)

(vgl. Königstein 2009, S.73).

Dies ist die korrekte Vorgehensweise um den U-Werte eines Fensters zu bestimmen. Im Falle eines üblichen Fensters ist der Einbezug des Fensterrahmens äußerst sinnvoll, da dieser im Normalfall von der Dämmwirkung her schlechter ist als die Glasfläche. Dabei ist neben dem verwendeten Glas und der Luftraumfüllung der Abstand bei einer Doppelverglasung für die Dämmwirkung entscheidend. Die Abhängigkeit ist in Abbildung 22 gezeigt.

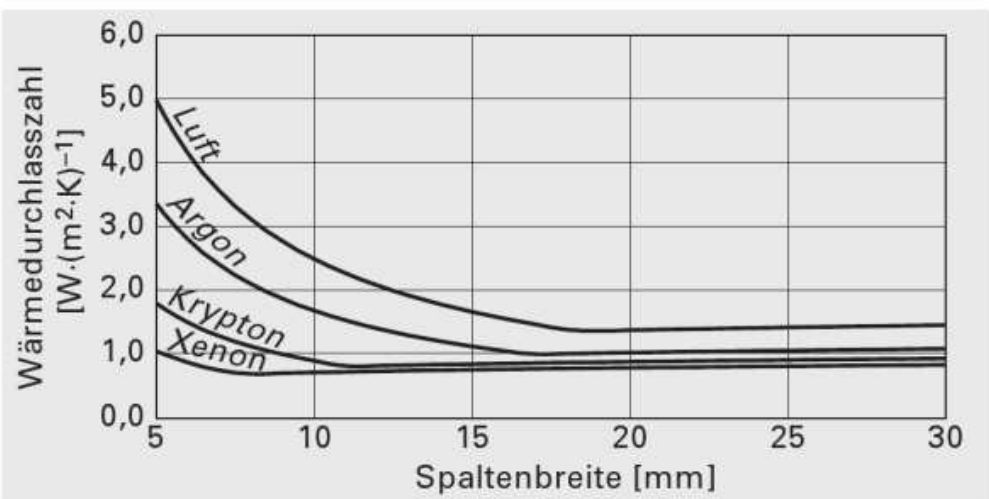


Abbildung 21: Abhängigkeit der Wärmedurchlasszahl von der Spaltbreite (Zürcher und Frank 2004, S. 33).

Bei dem vorliegenden Versuch dagegen ist davon auszugehen, dass die Plexiglasfläche einen weitaus schlechteren Dämmwert aufweist als sein Rahmen, da hier nur ein sehr geringe Spaltbreite von 0,7 cm der beiden Plexiglasscheiben vorliegt. Deshalb wird im Versuch ausschließlich das Fenster vermessen, um deutlich zu machen, wie entscheidend der Abstand der beiden Plexiglasscheiben für das Erreichen eines guten U-Wertes ist und dies anschließend zu diskutieren.

4.2.2 Betonwand

Materialien

Estrich/Feinbeton der Firma Baumit (Betonwand: 3cm Dicke)

Dämmsystem mit Dämmstoff StarTherm XS022 der Firma Baumit (Dicke: 7cm)

Kleber StarContact der Firma Baumit (Dicke 7 mm)

Nanopor Top (Dünnschichtdeckputz) (Dicke 2mm)

Maße

LxBxD: 35 cm x 22 cm x 10 cm

Literaturwerte

ʎ-Wert Beton: 1,4 (2000 kg/m^3)

ʎ-Wert StarTherm XS022: 0,021 W/m²K (laut Hersteller)

ʎ-Wert Nanopor Top: 0,7 W/mK

ʎ-Wert Star Contact XS: 0,82 W/mK (DIN NORM 4108-4)

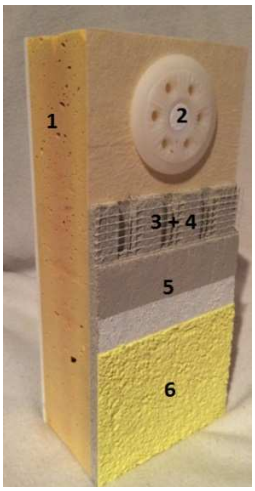
Abbildung 22: Frontansicht Betonwand.

Der Einsatz von Betonwänden ist im Gebäudebau sehr vielseitig und häufig.

Bei einer Betonwand liegen zwei verschiedene Methoden vor, mit denen eine solche Wand gedämmt werden kann. Es wird zwischen einer Kerndämmung und einer Außen-, bzw. Innendämmung unterschieden, wobei bekannt ist, dass eine Außendämmung meist effektiver ist. Sie ist jedoch zum Beispiel bei denkmalgeschützten Gebäuden oftmals die einzige Möglichkeit der nachträglichen Dämmung. Häufig werden auch die Kerndämmung und die Außendämmung kombiniert. So ist es zum Beispiel bei den um Mitte des 20. Jahrhunderts entstandenen „Plattenbauten“ ist es häufig nötig, zu der bereits vorhandenen

Kerndämmung eine Außendämmung anzubringen, da es bei diesen Gebäuden durch die starken Witterungseinwirkungen zu statischen Problemen kommen kann. Vorteile von Betonwänden sind beispielsweise, dass Beton sehr vielseitig einsetzbar ist. Es gibt ganz unterschiedliche Arten von Beton, die je nach Verwendungsart eingesetzt werde können und er kann entweder vor Ort gegossen oder bereits als Fertigbauteil zum Bauplatz gebracht werden. Zusätzlich wird Beton aus natürlichen Baustoffen Zement, Wasser, Sand, Kies hergestellt, welche leicht zu beschaffen sind und eine große Häufigkeit aufweisen, wodurch er wiederrum eine hohe Wirtschaftlichkeit aufweist (vgl. Heck 2007, S 76).

Als Dämmung wurde die häufig eingesetzte und beste Wärmedämmung StarTherm XS 022 der Firma Baumit eingesetzt. Bei dem StarTherm XS 022 handelt es sich laut Hersteller um eine 7 cm dicke Wärmedämmplatte, welche aus FCKW-freiem Resol-Hartschaum mit Glasvlies hergestellt wurde. Diese Dämmung eignet sich sowohl für eine Dämmung im Neubau und für die thermische Sanierung im Altbau. Bei der eingesetzten Dämmplattendichte weißt diese im Normalfall eine Wärmeleitfähigkeit λ von 0,021 W/mK. In Abbildung 24 ist der Aufbau des Dämmaufbaus zu sehen.



1. StarContact XS 022
2. Schraubdübel
3. StarContact XS
4. StarTex fein
5. StarContact XS
6. PremiumPrimer DG 27
7. NanoporTop 2mm

Abbildung 23: Aufbau Dämmaufbau StarTherm.

4.2.3 Holzwand

Der Holzbau bietet vor allem unter den Gesichtspunkten energieeffizientes Bauen, Ökologie und Ökonomie eine gute Alternative zu den konventionellen Baustoffen. Dabei hat er eine lange Tradition in Mitteleuropa und erlebte in den 90 er Jahren eine Renaissance, sowohl im Bau von Wohnhäusern, Büros, Hallen, Brücken bis zu hochkomplexen Bauprojekten. Dieser Baustoff weißt eine hervorragende Ökobilanz auf und stellt einen nachhaltigen Rohstoff dar, solange gewährleistet werden kann, dass die Menge an genutztem Holz die nachwachsende Menge nicht übersteigt.

Besonders häufig eingesetzt werden heutzutage die Holzrahmenbauweise, die Massivholzbauweise und der Fachwerkbau. Dabei ist zu beachten, dass die Holzeigenschaften stark von der Art des eingesetzten Holzes, sowie aber auch innerhalb einer Holzart je nach Herkunft, abhängen. Auch ist es wichtig beim Bau mit Holz zu beachten, dass es sich bei diesem Baustoff um ein organischen handelt. Für den Baustoff Holz sind dabei die Anisotropie, die Hygroskopizität und die Porosität charakteristisch. Die Anisotropie des Holzes bestimmt zusätzlich die Materialeigenschaften. Es liegen drei anatomische Hauptrichtungen, parallel zur Faserrichtung, radial zur Faserrichtung und tangential zur Faserrichtung vor. Bei einer Planung bzw. des Baues eines Holzhauses ist auf diese Anisotropie besonders zu achten, da dies zum Beispiel auch sehr stark das mittlere Schwind- und Quellmaß beeinflusst.

Deshalb ist es unbedingt notwendig eine Sortierung nach der Festigkeit, die mit den Wuchseigenschaften zusammen hängt, vorzunehmen. Beim Einsatz sind dann die Belastungsdauer und die Art der Krafteinwirkung wichtig zu beachten.

Holz weißt hygroskopische Eigenschaften auf, was bedeutet, dass es dazu neigt Feuchtigkeit aus der Umgebung aufzunehmen, welche sich in den Zellhohlraumen einlagert. Üblicherweise werden im Bauwesen Holzarten verwendet, die nicht mehr als 30-35% Holzfeuchte aufweisen, was bedeutet, dass ab diesem Punkt eine Fasersättigung eintritt. Die hohe Porosität von Holz führt dazu, dass er ein schlechter Wärmeleiter ist und sich damit sehr gut als Wärmedämmung eignet. Jedoch sinkt der Effekt der Wärmedämmung bei einer hohen Holzfeuchte oder einer hohen Rohdichte des Holzes. Auch weißt der Werkstoff Holz eine relativ gute Schalldämmung auf. Beispielsweise kann mit einer Spanplatte der Flächendichte von 15- 20 kg/m^2 eine Schalldämmung von bis zu 26 dB erreicht werden.

Weitere Vorteile sind, dass das Holz als ästhetisch ansprechend empfunden wird, einen CO2-Speicher darstellt, beim Bau ein geringer Energieaufwand von Nöten ist, da er leicht

und verarbeitet werden kann und eine trockene Bauweise vorliegt. Außerdem schafft Holz ein angenehmes Wohnklima und ist biologisch abbaubar, was aber gleichzeitig wiederrum ein Problem darstellt, da es somit auch anfällig gegenüber biotischen Schädlingen ist (vgl. Lückmann 2009, S. 15 ff.).

Im vorliegenden Versuch, wird die Holzrahmenbauweise eingesetzt, weshalb der grundsätzliche Aufbau im Folgenden kurz erläutert wird.

4.2.4 Der Holzrahmenbau

Der Holzrahmenbau ist gekennzeichnet durch einen einfachen mehrschichtigen Bauteilaufbau. Er besteht aus einem Rahmen, im Normalfall einer Beplankung außen bzw. innen und einer Dämmung im Hohlraum.

Auf Grund seiner einfachen und kostengünstigen Bauweise hat sich der Holzrahmenbau als flächen- und energiesparendes Leichtbausystem in den letzten Jahrzehnten in der Baubranche etablieren können. (vgl. Dederich 2009, S. 8 ff.). In Abbildung 25 ein möglicher Aufbau des Holzrahmenbaus zu sehen.

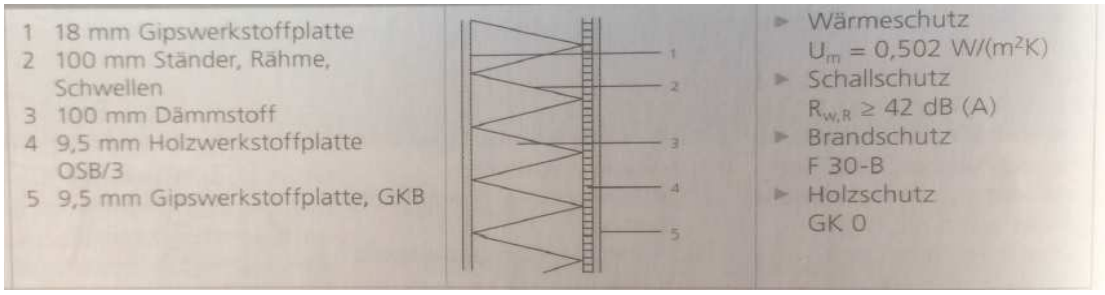


Abbildung 24: Holzrahmenbauweise grundsätzlicher Aufbau (nach Lückmann 2009, S. 58).

Als Dämmmaterial können bei dieser Bauweise ganz unterschiedliche Materialien verwendet werden um einen Vergleich zu ermöglichen. Im Versuch werden zwei unterschiedliche Dämmmaterialien, einmal der chemisch hergestellte und weit verbreitete Dämmstoff Expandierter Polystyrol (EPS) und in dem zweiten Wandaufbau der natürliche und alternative Dämmstoff Holzfaser verwendet. Zusätzlich gibt es an der Wand, die mit EPS gedämmt wird, ein Modul, das zusätzlich angebracht werden kann, um damit die Funktionsweise und die Dämmleistung einer hinterlüfteten Wand zu ermöglichen.

4.2.4.1 Dämmung mit Expandiertem Polystyrol

Materialien

Fichtenholz (Dicke 1,8 cm → zwei Platten)

Dünne Spanplatten um die Seiten zu Verschließen (Dicke 2 mm)

Holzleim

Expandiertes Polystyrol (Dicke: 6,4cm)

Abbildung 25: Frontansicht Holzwand mit EPS Dämmung.

Maße

Holzwand: LxBxD: 35 cm x 22 cm x 10 cm

Literaturwerte

ʎ-Wert Fichte: 0,13 W/mK (Dicke 1,8 cm)

ʎ-Wert EPS: 0,04 W/mK

(DIN NORM 4108-4)

Hergestellt wird EPS aus einem expandierbaren Polystyrol Granulat, welches unter Zusatz des Treibmittels Kohlenstoffdioxid aufgeschäumt wird. Dabei besteht es zu 99 % aus Polystyrol. Zusätzlich werden Brandschutzmittel und Antioxidationsmittel zugesetzt. Durch die Extrusion entstehen viele kleine Zellen, durch welche eine hohe mechanische Belastbarkeit und Unempfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit gegeben ist. ESP eignet sich über die Wanddämmung hinaus als Innendämmung, Kerndämmung, Außendämmung als auch für die Dämmung der Decken bzw. des Dachs.

Es handelt sich hierbei um einen sehr weit verbreiteten und häufig eingesetzten Dämmstoff, da er eine sehr gute Wärmedämmung vorweist. Zusätzlich ist er sehr einfach mit Sägen oder einem Glühdraht zu bearbeiten und wird direkt mit Kunstharzkleber an die zu dämmende Wand geklebt.

Jedoch ist die Herstellung von EPS als umweltkritisch zu betrachten, denn der Rohstoff für die Herstellung des Styrols für die Polystyrol Granulate wird aus Erdöl und Erdgas gewonnen. Auch die Beständigkeit gegenüber organischen Lösungsmitteln und deren Dämpfe, die beispielsweise in Klebern, Anstrichstoffen und Teerprodukten vorkommen, sind gering. Dagegen ist ESP aber, da es biologisch nicht abgebaut werden kann, sehr beständig gegenüber Schimmelpilzen oder ähnlichem, sowie beständig gegen saure und alkalische

Medien. Das Recyceln der EPS-Platten nach einen Rückbau ist möglich (vgl. Zelger 2000, S. 62 ff.; Riedel 2007, S. 80 ff.).

4.2.4.2 Dämmung mit Holzfaserdämmplatten

Materialien

Fichtenholz (Dicke 1,8 cm → zwei Platten)

Dünne Spanplatten um die Seiten zu Verschließen (Dicke 2 mm)

Holzleim

Holzfaserdämmplatte (Dicke: 6,4 cm)

Maße

Holzwand: LxBxD: 36 cm x 22 cm x 10 cm

Literaturwerte

λ-Wert Fichte: 0,13 W/mK

λ-Wert Holzfaserdämmplatte: 0,039 W/mK

(DIN NORM 4108-4)

Abbildung 26: Frontansicht Holzwand mit Holzfaserdämmung.

Bei den Holzfaserdämmplatten handelt es sich um einen natürlichen Dämmstoff. Er wird beispielsweise aus Fichten- und Kiefernrestholz, Schwachholz, Durchforstungshölzer sowie Wind und Schneebruchholz hergestellt. Dabei wird also das an anderer Stelle schwer einsetzbares Restholz verwertet und dadurch wird zusätzlich ein Beitrag zur Rohstoffverwertung geleistet.

Zur Verbindung der Holzfasern ist im Normalfall kein Bindemittel notwendig, dagegen werden zur Aktivierung der im Holz enthaltenen Lignine kleine Mengen an Aluminiumsulfat eingesetzt. Teilweise werden die Holzfaserdämmplatten zusätzlich mit Harzen oder Bitumen imprägniert.

Die Holzfaserplatten sind sowohl für die Wanddämmung - Innendämmung, Kerndämmung und Außendämmung - als auch für die Dachdämmung geeignet.

Die Wärmedämmwirkung hängt vom Produkt ab und kann dabei zwischen quantitativen Werten von mittel bis sehr gut schwanken. Dagegen weißen diese Dämmplatten gegenüber anderen Dämmstoffen eine gute Wärmespeicherfähigkeit auf.

Aus ökologischen Sichtpunkten ist der vorliegende Dämmstoff als sehr gut einzuschätzen, da er aus der erneuerbaren und biologisch abbaubaren Ressource Holz und dabei sogar aus dem Holzabfalls hergestellt wird. Zusätzlich ist bei der Herstellung auf Grund des Einsatzes von lokalen Holzabfällen die Umweltbelastung durch Transportwege sehr gering.

Ein Nachtteil stellt aber dabei die mögliche Zersetzung der Dämmplatten durch Mikroorganismen und Kleinstlebewesen dar. Hersteller geben eine Lebensdauer von ca. 50 Jahren an (vgl. Zelger 2000, S. 82 ff.; Riedel 2007, S.93 ff.).

4.2.4.3 Hinterlüftete Fassade

Materialien:

Fichtenholzlatten 5 x 20 x 1000 mm (4 Stück)
Fichtenholzlatte 5 x 10 x 1000 mm
Holzleim

Maße:

Vorhangfassade: LxBxD: 35 cm x 21 cm x 0,5 cm
Dicke Hinterlüftung: 0,5 mm

Eine hinterlüftete Fassade stellt eine Alternative zu den Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) dar, welche sich sowohl für den Neubau als auch für die nachträgliche Dämmung an bestehenden Gebäuden eignet. Derzeit wird diese Methode noch vorwiegend im Gewerbebau eingesetzt. Dabei stellt diese Methode eine etwas kostenintensivere Methode als die WDVS dar, bietet aber mehrere Vorteile, wie den besonders dauerhaften Witterungsschutz, sehr gute bauphysikalische Werte und ermöglicht die Wahl einer repräsentativen Fassadengestaltung. Jedoch entsteht durch die Luftschicht eine Kaminwirkung, wodurch wiederum eine erhöhte Brandgefährdung auftritt. Dies bedingt, dass eine geeignete Wahl an nicht entflammbaren Dämmstoffen getroffen werden muss. Geeignet wären als Dämmmaterial zum Beispiel Mineralfaser-Fassadendämmplatten oder wie im Versuch, EPS-Platten. Entscheidend ist auch die Wahl der Unterkonstruktion bzw. der Befestigung der Unterkonstruktion. Bei einer falschen Wahl der Unterkonstruktion kann es zur Bildung von Wärmebrücken kommen. In Abbildung 27 ist exemplarisch gezeigt, wie solch eine hinterlüftete Fassade auf einer Mauerwand gebaut werden kann. Darunter in Abbildung 28 ist dann die Verwirklichung im Versuch aufgezeigt.

Wie zu sehen ist, besteht ein solcher Aufbau im Prinzip aus vier Komponenten, der Unterkonstruktion (inklusive den Befestigungsmitteln, wie Dübel usw.), der Dämmung, der Hinterlüftung und der Fassadenverkleidung. Bei der Fassadenverkleidung kommen unterschiedliche Materialien in Frage: Schieferplatten, Steinplatten, Holzschindeln, Holzschalung und viele weitere. Im Versuch wurde die Hinterlüftung mit Hilfe einer Holzschalung als Fassade und zu der Holzschalung vertikal ausgerichtete Holzbalken als Unterkonstruktion verwirklicht.

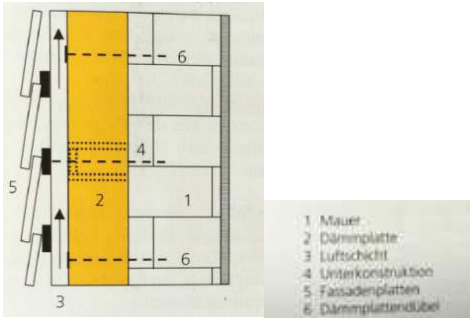
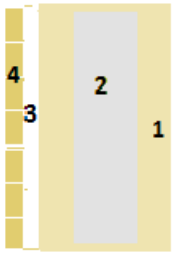


Abbildung 27: Hinterlüftete Fassade angebracht auf einer Mauerwand (Königstein 2009, S. 49).



1. Holzrahmen
2. Expandierter Polystyrol-Platten
3. Luftschicht mit darunter liegenden 4 vertikalen Holzbalken
4. Holzschalung

Abbildung 28: Schematischer Zeichnung des Aufbaus der Hinterlüfteten Fassade im Versuch.

Schematischer Aufbau der im Versuch eingesetzten Holzwand mit hinterlüfteter Fassade

Diese hinterlüftete Fassade kann im Versuch zusätzlich vor der mit EPS-Platten gedämmte mit Hilfe von Metallhaken angebracht werden, um so sowohl Messungen ohne und mit der Hinterlüftung ermöglichen zu können (Heck S.44 und Königstein S. 48 f.).

4.2.5 Wasserheizung

Materialien

Heizhäuschen:

Konservendose

Dämmung aus Glaswolle (Umrandet mit Aluminiumklebeband) und Styropor

Fichtenholz

Holzleim

Heizungskomponenten:

Tauchsieder TS 1502 1500 Watt der Fima Rommelsbacher

Wasserpumpe 25-02G3, 3,5 bis 12 Volt

Netzteil 12 Volt

Universal Thermostat UT 200 der Firma Conrad

Silikonschlauch mit den Innendurchmessern 6,5 mm und 9,5 mm

Maße: 38,6 cm x 38,6 cm

Eine Heizung ist ein wichtiges Element, der einen Raum für seine Bewohner behaglich macht. Es gibt unterschiedliche Arten und Bauweisen von Heizungen, wobei sich heute hauptsächlich zwei Bauweisen von Heizungen durchgesetzt haben, die Kompaktheizflächen, auch Heizkörper genannt und die Flächenheizungen. Unter Flächenheizungen wird sowohl die Fuß-, Wand-, und Deckenheizung verstanden, wobei hier im Versuch die Fußbodenheizung eingesetzt wird, da die anderen Flächenheizungen, vor allem im Privatbereich nur noch sehr selten um Einsatz kommen. Beide Heizungsarten weißen sowohl Vor-und Nachteile auf, so dass von Fall zu Fall unterschieden werden muss, welche Art vorteilhafter ist.

In Tabelle 9 sind Kriterien aufgezeigt.

Kriterien	Kompaktheizflächen	Fußbodenheizung
kostengünstig	trifft zu	eher kostenintensiv
Einfache Montage, Wartung, Austausch	trifft zu	trifft nicht zu
Schnelle Regelbarkeit	trifft zu	trifft nicht zu (außer bei Klimaböden)
Geringe Konvektion/ hoher Strahlungsanteil	trifft nicht zu	trifft zu
Keine Verschwelung	trifft nicht zu	trifft zu
Geringer Platzbedarf	trifft nicht zu	trifft zu
Niedrigenergiesystem	trifft teilweise zu	trifft zu

Tabelle 9: Gegenüberstellung der Vor-und Nachteile von einer Kompaktheizflächen und einer Fußbodenheizung.

Ein häufig angebrachtes Argument für die Fußbodenheizung ist ein physiologisches. Es ist bekannt, dass eine optimale Behaglichkeit dann eintritt, wenn ein Mensch warme Füße aber einen kühlen Kopf hat. Bei dem Einsatz einer Fußbodenheizung ist tritt dieser Fall ein (vgl. Königstein 2009, S.153 ff.).

Im Versuch ist, wie bereits erwähnt, eine innen installierte Heizung notwendig, um eine Temperaturdifferenz von mindestens 10 °C zu erhalten. Eine Fußbodenheizung wurde realisiert, in dem ein Silikonschlauch durch das Haus in Schlangenlinien verlegt wurde. Durch diesen Silikonschlauch wird mit Hilfe einer kleinen Wasserpumpe mit einem Tauchsieder auf ca. 45 °C erhitztes Wasser, gepumpt. Die Regelung des Tauchsieders erfolgt mit einem Thermostat.

4.3 Versuchsdurchführung

Das Thermohaus ist stets gleich aufgebaut, lediglich die EPS-Dämmung an der Ziegelwand und die Vorhangfassade an der Styroporwand müssen ja nach Bedarf montiert werden, außerdem kann zwischen dem Flachdach und dem Satteldach entschieden werden. Vor dem Fenster ist innen ein Vorhang angebracht, damit eine zuverlässige Messung möglich ist. Das Heizgefäß wird mit Wasser aufgefüllt. Anschließend wird die Messdatenerfassung

LabVIEW gestartet und nach einer Minute die Pumpe und der Tauchsieder mit Thermostat eingeschaltet. Das Haus wird zunächst zehn Stunden lang aufgeheizt, so dass sich ein stationärer Zustand einstellt. Während dieser Zeit ist es wichtig, dass die Fenster des Versuchsraumes geschlossen bleiben und sich keine Geräte, welche Wärme erzeugen, in der Umgebung befinden. Die Messwerte der Temperaturfühler werden mit der Messdatenerfassung LabVIEW dargestellt und in einem Text-File gespeichert. Es bietet sich an das Haus über Nacht mit Hilfe einer Zeitschaltuhr zu starten, damit am nächsten Morgen direkt mit der Messung begonnen werden kann.

Nach dem Einstellen des stationären Zustands beginnt die eigentliche Messung. Für jede neue Messung ist eine Kalibrierung der Kamera notwendig (siehe Kapitel 4.1.3).

Die Emissionsgrade werden, wie in Kapitel 4.1.3 erläutert, ermittelt und sind in Tabelle 10 zusammengetragen. Diese Emissionsgrade werden für die jeweilige Messung einer bestimmten Wand über das Menü der Kamera eingegeben. Zusätzlich muss der Abstand vom Objekt, sowie die Außentemperatur eingegeben werden. Um den Abstand während der gesamten Messung gleich zu halten, wurde eine Konstruktion gebaut, die einen Abstandshalter darstellt, in welchen die Wärmebildkamera eingesetzt werden kann.

Nachdem alle Vorbereitungen getroffen sind und die Kamera mit dem Abstandshalter vor der zu vermessenden Wand platziert ist, wird für die Messwertaufnahme mit LabVIEW ein neues File angelegt und die Messung mit der Wärmebildkamera und das Messwertaufnahme-Programm zeitgleich gestartet. Die gemessenen Werte werden notiert und die Bilder gespeichert. Das Messdatenaufnahme-Programm speichert alle 4 s den aktuell gemessenen Wert. Mit der Wärmebildkamera wird alle 10 Sekunden ein Bild aufgenommen. Insgesamt wird die Messung 5 Minuten lang durchgeführt, so dann etwa 75 Messdaten im angelegten Messfile und 30 Wärmebildaufnahmen vorliegen. Diese Messung wird für jede Wand, sowie für das Fenster und die zusätzliche Dämmung an der Ziegelwand wiederholt.

Oberfläche	Emissionsgrad
Gipsputz	0,93
Ziegel	0,94
Fichte	0,91
Styropor	0,93
Plexiglas	0,97

Tabelle 10: Emissionsgrade der zu untersuchenden Wandoberflächen.

4.4 Versuchsauswertung

Im Folgenden werden die Messergebnisse des neuen Thermohauses zusammenfassend vorgestellt. Dabei wird zunächst überprüft, wie lange das Haus von innen beheizt werden muss, bis sich ein stationärer Zustand einstellt. Danach werden die einzelnen Messwerte der unterschiedlichen Wände diskutiert, sowie deren Fehlerfortpflanzungen berechnet. Dabei werden auch einige Faktoren aufgezeigt, die zu einer Verfälschung der Messung führen können.

4.4.1 Überprüfung des stationären Zustands

Entscheidend ist es zunächst einmal herauszufinden, wie lange das Thermohaus aufgeheizt werden muss, damit sich ein stationärer Zustand eingestellt. Dabei ist es wichtig zu berücksichtigen, dass der stationäre Zustand bzw. eine konstante Temperatur an der Außenseite der Wand schneller einstellt als an der Innenseite der Wand. Dies wird auch in den beiden Abbildungen 29 und 30 deutlich. Bei der Außenseite der Wand stellt sich nach etwa vier ein halb Stunden eine konstanten Temperatur ein. Bei der Innenseite der Wand dagegen erst nach etwa zehn Stunden.

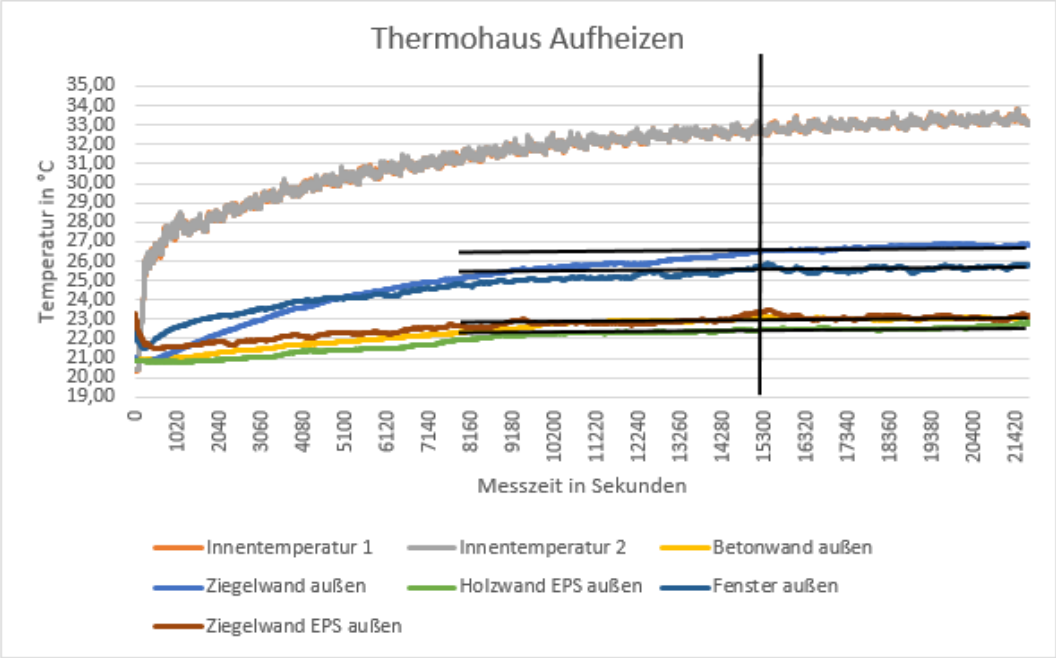


Abbildung 29: Überprüfung ab wann sich der stationäre Zustand an der Wandinnenseite eingestellt hat.

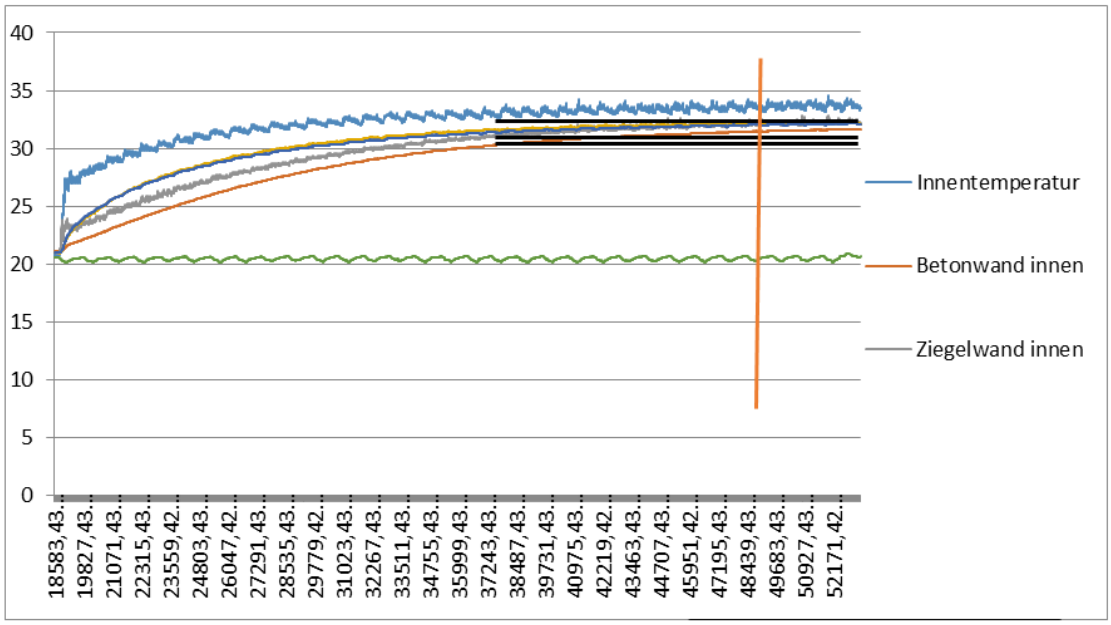


Abbildung 30: Überprüfung ab wann sich der stationäre Zustand an der Wandaußenseite eingestellt hat.

4.4.2 Auswertung der einzelnen Wände

Im Folgenden werden die Messwerte der einzelnen Wände dargestellt. Zunächst wird der Wärmedurchgangskoeffizient innen h_i und außen h_a anhand der ermittelten Emissionsgrade und der gemessenen Temperaturen, sowie deren Fehler für die weiteren Berechnungen bestimmt. Daran anschließend werden die theoretischen Temperatur-Orts-Diagramme berechnet und nachfolgend die gemessenen U-Werte mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung diskutiert, sowie überprüft, ob die Wärmebildkamera ein geeignetes und genaues Messinstrument zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten in dem aufgebauten Versuch darstellt.

4.4.2.1 Theoretische Berechnungen zur Ziegelwand

Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten h_i.

Wie bereits in Kapitel 3.2 erläutert, müssen für die folgenden Berechnungen der Wärmeübergangskoeffizienten h_i und h_a der Wand berechnet werden. Hierfür werden die beiden Bestandteile, der konvektive Wärmeübergangskoeffizient (mit Gleichung 14, 13 und 15) und der strahlungsbedingte Wärmeübergangskoeffizient (mit Gleichung 19) für jede

Wand mit den maximal und minimal gemessenen Temperaturen berechnet. Bei der Berechnung des strahlungsbedingten Wärmeübergangskoeffizienten wird vereinfacht nur die Strahlungsleistung der gegenüberliegenden Wand einbezogen und die Strahlungsleistung der angrenzenden Wände außer Acht gelassen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengetragen.

Temperatur innen in °C	**Temperatur Wand innen Ziegel in °C**	**Temperatur Wand innen Holz in °C**	**h_K in W/(m²K)**	**h_S in W/(m²K)**
33,6	32,38	29,65	2,10	6,17
33,5	32,35	29,22	2,06	6,16

Tabelle 11: Messwerte zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten innen.

Damit ergibt sich ein maximaler Wert h_{imax} = 2,10 + 6,17 = 8,27 W/(mK)

und ein minimaler Wert h_{imin} = 2,06 + 6,16 = 8,22 W/(mK),

was im Mittel einem h_i = 8,245 W/(mK) R_i=0,12 entspricht.

Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten h_a.

Der h_a - Wert wird ebenso wie der h_i - Wert bestimmt. Hierbei werden alle für die Ziegelwand bestimmten Messwerte zur Errechnung der h_a- Werte herangezogen um, den Fehler genauer bestimmen zu können, da der h_a Wert zur Berechnung der U-Werte herangezogen wird. Für die Berechnung des strahlungsbedingten Wärmedurchgangskoeffizienten können jedoch für den Emissionsgrad der Wände des Laborraumes und dessen Wandtemperatur nur Annahmen getroffen werden. Für den Emissionsgrad wird ein für Baustoffe üblicher Wert von $\varepsilon = 0{,}92$ und eine Wandtemperatur von 18 °C. Allerdings sind diese Werte nicht exakt bestimmbar, da diese auch maßgeblich dadurch beeinflusst werden, dass die versuchsdurchführende Person sich bei der Messung vor der Wand befindet und damit zur Temperaturerhöhung beinträgt. Um diesen Einfluss jedoch bestimmen zu können, wären weitergehende Untersuchungen und Messungen notwendig.

Temperatur außen in °C	Temperatur Wand außen Ziegel in °C	h_K in W/(m²K)	h_S in W/(m²K)	h_a in W/(m²K)
20,4	25,9	3,17	5,71	8,88
20,5	25,9	3,16	5,71	8,87
20,3	25,9	3,19	5,71	8,9
20,4	25,9	3,18	5,71	8,89
20,5	26	3,17	5,71	8,88
20,3	25,9	3,20	5,71	8,91
20,5	26	3,17	5,71	8,88
20,6	26	3,16	5,71	8,87
20,4	26	3,18	5,71	8,89

Tabelle 12: Messwerte zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten außen.

Durch Mitteln der errechneten Wärmedurchgangskoeffizienten ergibt sich ein Wert von:

$$h_a = 8{,}89 \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$

Mit folgender Gleichung wird dann die Standardabweichung bestimmt:

$$s = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$

$$s = 0{,}0126 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Die Standardabweichung des Mittelwerts ergibt sich dann durch:

$$m = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$m = 0{,}0042 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Berechnung des Vertrauensbereichs Δx:

$$\Delta x = \tau \cdot m$$

Dabei beinhaltet der Proportionalitätsfaktor τ sowohl das Vertrauensniveau sowie auch den Stichprobenumfang. Bei einem Stichprobenumfang von 9 Messungen und einem Vertrauensniveau von 95,4 % gilt:

$$\tau = 1{,}833$$

Damit ergibt sich für die Innentemperatur ein Korrekturfaktor von:

$$\Delta x = 1{,}833 \cdot 0{,}0042 = 0{,}008 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Ohne Einbezug des systematischen Fehlers liegt somit ein Fehler bzw. ein Messbereich von:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x$$

$$x = (8{,}89 \pm 0{,}008) \text{ W/(m}^2\text{K) vor.}$$

Alle folgenden Berechnungen der Vertrauensbereich werden auf diese Weise berechnet.

Berechnung der theoretischen U-Werte

Aus den bereits in Kapitel 4.2.1 genannte Wärmeleitfähigkeiten können mit Hilfe folgender Rechnung die theoretischen U-Werte bestimmt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Literaturwerte nur Richtwerte darstellen, denn die Wärmeleitfähigkeiten des eingesetzten Materials sind nicht immer bekannt, weshalb übliche Werte aus der DIN NORM 4108-4 zur Berechnung der theoretischen U-Werte herangezogen werden.

$$R_{Ziegel} = \frac{d}{\lambda} = \frac{0{,}025m}{0{,}96} = 0{,}02604 \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

$$R_{Gesamt} = R_i + R_{Ziegel} + R_i = 0{,}12 + 0{,}026041 + 0{,}11 = 0{,}256 \frac{\mathrm{m^2K}}{\mathrm{W}}$$

Damit ergibt sich ein U-Wert von:

$$U = \frac{1}{R_{Gesamt}} = \frac{1}{0{,}256} = 3{,}9 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Alle folgenden U-Werte werden auf diese Weise berechnet.

Für die Ziegelwand mit EPS-Dämmung ergibt sich ein Wert für den Wärmedurchgangskoeffizienten von:

U= 0,66 W/m²K

Berechnung des Temperatur-Orts-Diagramms der Ziegelwand

Für die Berechnung werden für die Innen- und Außentemperatur gemittelte Werte verwendet, damit diese Werte zum Vergleich mit den praktische ermittelten Wandinnen- und Wandaußentemperaturen herangezogen werden können:

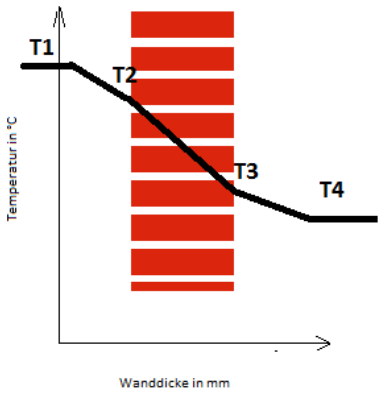


Abbildung 31: Temperatur-Ortsdiagramm Ziegelwand.

Innentemperatur: 33,7 °C

Außentemperatur: 19,5 °C

Gesamtwiderstand R_{Gesamt}= $0{,}256\ \frac{m^2K}{W}$;

Temperaturdifferenz innen und außen: 14,2 °C

1. <u>Temperatur Wand innen:</u>

Widerstände: R_{Luft}= $0{,}12\ \frac{m^2K}{W}$;

Anteil am Gesamtwiderstand: $\frac{0{,}12\ \frac{m^2K}{W}}{0{,}256\ \frac{m^2K}{W}} = 0{,}43$

Temperatur: $33{,}7 - (0{,}43 \cdot 14{,}2) = \ 27{,}07$ °C

Auf diese Weise werden alle theoretischen Wandaußen und Wandinnentemperaturen bestimmt. In der Tabelle 13 sind alle berechneten Werte für die Ziegelwand aufgeführt:

T1	T2	T3	T4
33,7	27,07	25,9	19,5

Tabelle 13: Wandaußen- und Zwischentemperaturen Ziegelwand.

Theoretische Berechnung der Wandtemperaturen mit Dämmung

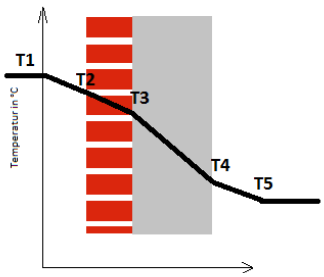


Abbildung 32: Wandaußen- und Zwischentemperaturen Ziegelwand mit EPS- Dämmung.

T1	T2	T3	T4	T5
33,7	31,75	26,45	19,94	19,5

Tabelle 14: Wandaußen- und Zwischentemperaturen Ziegelwand.

4.4.2.2 Messergebnisse für die Ziegelwand

Im Folgenden werden die ermittelten Ergebnisse der Messungen an der Ziegelwand vorgestellt, deren Fehler mit Hilfe der Standardabweichung bestimmt und der gesamte Fehler mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung berechnet.

In Tabelle 15 werden die Wärmedurchgangskoeffizienten, bei denen in die Berechnung die mit der Wärmebildkamera ermittelten Wandaußentemperaturen und die mit dem Thermofühler ermittelten Wandaußentemperaturen verglichen.

Messaufnahme	Wärmebildkamera	Thermofühler
1	3,7	3,7
2	3,7	3,6
3	3,7	3,7
4	3,7	3,7
5	3,8	3,7
6	3,8	3,73
7	3,7	3,7
8	3,7	3,7
9	3,6	3,7
Mittelwert	**3,7**	**3,7**

Tabelle 15: ermittelte Wärmedurchgangskoeffizienten, gemessen mit der Wärmebildkamera bzw. dem Thermofühler für die Ziegelwand.

Fehlerfortpflanzung U-Wert

Um die oben aufgeführten Werte auf ihre Qualität hin beurteilen zu können, wird anhand der ermittelten Temperaturen mit Hilfe der Standardabweichung der Korrekturwert bestimmt und eine Fehlerfortpflanzungs-Rechnung durchgeführt.

Standardabweichung der Innentemperaturen und Außentemperaturen

Zunächst wird die Standardabweichung der gemessenen Innen- und Außentemperaturen ermittelt:

	Innentemperaturen gemittelt	Außentemperaturen gemittelt
1	33,52	19,76
2	33,84	19,94
3	33,60	19,39
4	33,80	19,37
5	33,63	19,36
6	33,67	19,45
7	33,68	19,43
8	33,62	19,49
9	33,85	19,38
Standardabweichung	**0,109**	**0,192**

Tabelle 16: gemittelte Innen-und Außentemperaturen zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Ziegelwand.

Es wird deutlich, dass die Innentemperatur über mehrere Messungen hinweg kleineren Schwankungen unterliegt als die Außentemperaturen, was ebenso bei der Betrachtung der in Abbildung 34 und 35 deutlich wird. Zwar unterliegt die Innentemperatur innerhalb einer Messung Schwankungen, jedoch gleichen sich diese Schwankungen weitgehend aus. Dadurch, dass die Temperatur mit der Heizung durchgehend geheizt wird, welche wiederrum durch den Thermostat im Wasserbehälter möglichst gleichmäßig während der gesamten Messungen gehalten wird, unterliegt die Innentemperatur aber im Mittel eher geringen Schwankungen. Die Schwankungen der Außentemperaturen lassen sich darauf zurückführen, dass die Raumtemperatur nie ganz konstant ist, vorallem, wenn der Raum mit einer Heizung gewärmt wird, was bei diesen Messungen der Fall ist. Außerdem kommen Schwankungen zustande, wenn die Türe zwischen den Messungen geöffnet wird oder die versuchsdurchführende Person ihren Platz wechselt.

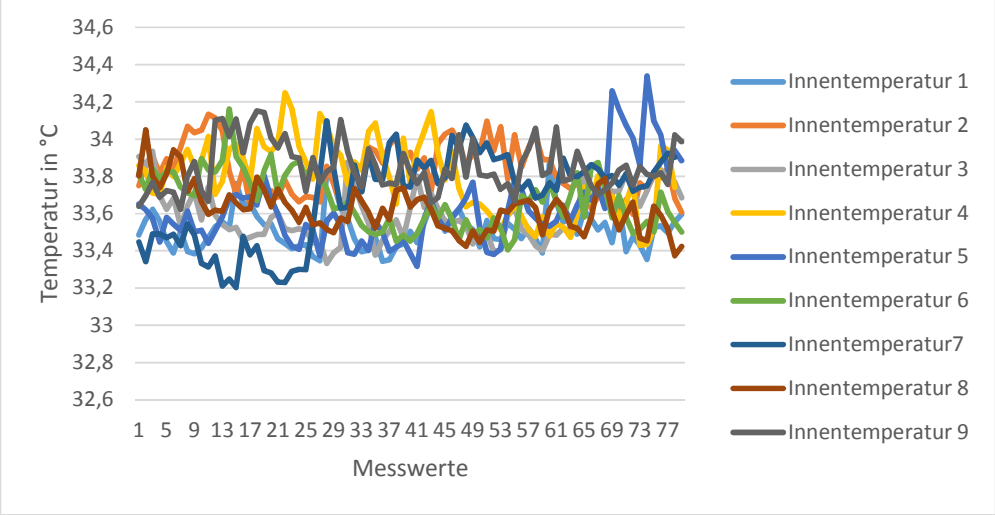


Abbildung 33: Darstellung der Innentemperaturen zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Ziegelwand.

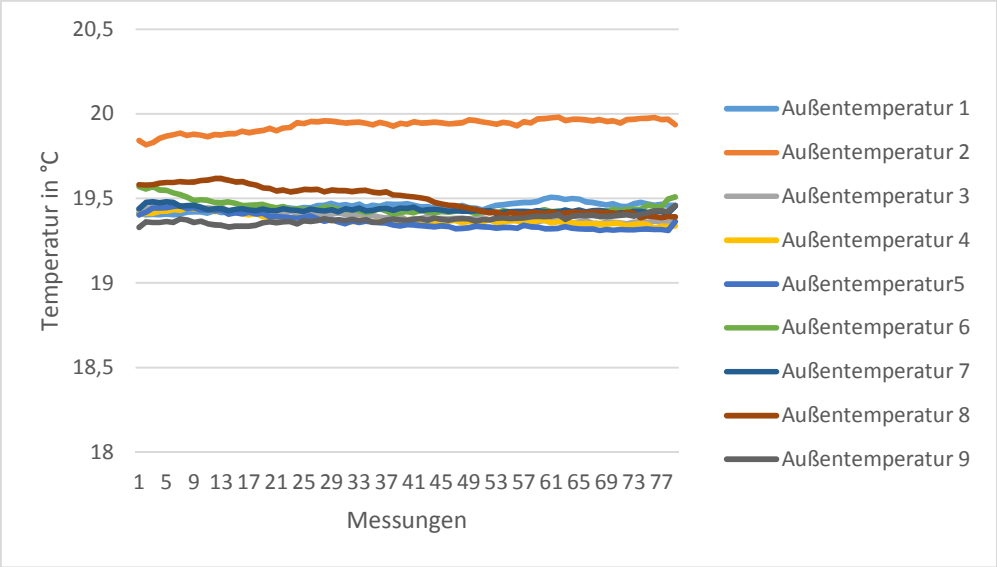


Abbildung 34: Darstellung der Außentemperaturen zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Ziegelwand

Die Berechnung des Vertrauensbereichs wird wie oben angeben berechnet und in der Tabelle 18 zusammengetragen.

Auf dieselbe Weise wird auch mit den Wandaußentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und mit dem Thermofühler verfahren.

In der folgenden Tabelle werden die gemittelten Werte über die Messungen und deren Standardabweichungen aufgelistet:

	Wandaußentemperatur mit Thermofühler gemittelt	**Wandaußentemperatur mit Wärmebildkamera gemittelt**
1	25,88	25,86
2	25,92	26,00
3	25,86	25,93
4	25,92	26,00
5	25,96	26,13
6	25,90	26,00
7	25,96	26,00
8	25,99	26,07
9	25,97	25,86
Standardabweichung	**0,042**	**0,084**

Tabelle 17: gemittelte Wandaußentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Ziegelwand.

Bei Betrachtung der Werte wird deutlich, dass durch die Messung mit der Wärmebildkamera doppelt so hohe Schwankungen auftreten, als bei der Messung mit dem Thermofühler. Die wird auch in Abbildung 35 deutlich. Die Ursache liegt wahrscheinlich darin, dass die Wärmebildkamera nur Werte von einer Genauigkeit von einer Stelle hinter dem Komma angeben kann. Außerdem ist die Messung mit der Wärmebildkamera sehr stark abhängig von der Ermittlung des Emissionsgrades, der Außentemperatur, der reflektierten Temperatur und von äußeren Einflüssen wie eventuellen Fremdstrahlungsquellen. Es ist aber auch ersichtlich, dass durch die Mittelung der einzelnen Werte zuverlässige Werte vorliegen, welche weitgehend mit den mit dem Thermofühler gemessenen Temperaturen übereinstimmt.

Wie in Abbildung 35 zu sehen ist, unterliegen die Temperatur-Werte der Außenwand Schwankungen um bis zu 0,1 °C jedoch können diese Schwankung über die Mittelung der aufgenommenen Messwerte weitgehend ausgeglichen werden. Zusätzlich liegt bei der Messung mit dem Thermofühler ein Anstieg der Temperatur von etwa 0,1 °C vor.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Person, welche die Messdaten aufnimmt, während der Messung vor der Wand steht, um alle 10 s den Auslöser der Kamera zu betätigen. Hierbei kommt es dann zur Strahlungsübertragung von der Person zur Wand.

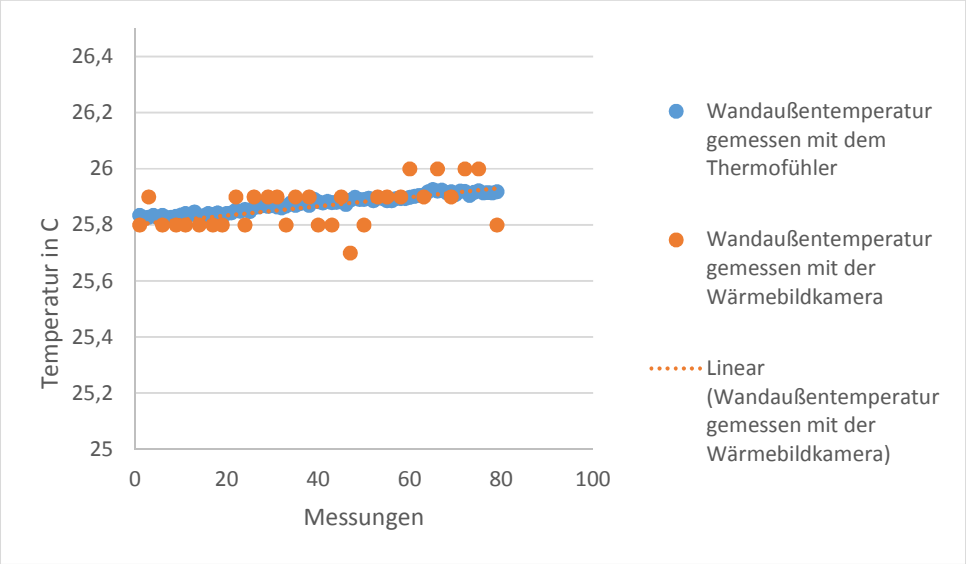


Abbildung 35: Vergleich Wärmebildkamera und Thermofühler an der Ziegelwand siehe Messung 1

	Mittelwert in °C	Standardabweichung des Mittelwerts in °C	Vertrauensbereich in °C
Innentemperatur	33,7	0,036	0,066
Außentemperatur	19,5	0,064	0,117
Wandaußentemperatur Thermofühler	25,9	0,0138	0,025
Wandaußentemperatur Wärmebildkamera	26,0	0,03	0,05

Tabelle 18: Ermittlung des Vertrauensbereichs der Innen- und Außentemperaturen, sowie der Wandaußentemperaturen.

Im Folgenden wird nun die Fehlerfortpflanzung mit Hilfe der Gleichung berechnet:

$$\Delta f(x_1, x_2, \dots x_n) = \left|\frac{\partial f}{\partial_{x1}}\right| \Delta x_1 + \left|\frac{\partial f}{\partial_{x2}}\right| \Delta x_2 + \cdots + \left|\frac{\partial f}{\partial_{xn}}\right| \Delta x_n$$

$$U = h_a \frac{(T_{Wa} - T_{La})}{(T_{Li} - T_{La})}$$

$$\Delta U(h_a, T_{Wa}, T_{La}, T_{Li}) = \left|\frac{\partial U}{\partial h_a}\right| \Delta ha + \left|\frac{\partial U}{\partial T_{Wa}}\right| \Delta T_{Wa} + \left|\frac{\partial U}{\partial T_{La}}\right| \Delta T_{La} + \left|\frac{\partial U}{\partial T_{Li}}\right| \Delta T_{Li}$$

$$\begin{aligned}\Delta U(h_a, T_{Wa}, T_{La}, T_{Li}) \\ &= \left|\frac{T_{Wa} - T_{La}}{T_{Li} - T_{La}}\right| \Delta ha + \left|\frac{h}{T_{Li} - T_{La}}\right| \Delta T_{Wa} + \left|\frac{h(T_{Wa} - T_{La})}{(T_{Li} - T_{La})^2} - \frac{h}{T_{Li} - T_{La}}\right| \Delta T_{La} \\ &+ \left|\frac{(T_{La} - T_{Wa})h}{{T_{Li}}^2 - 2T_{La}T_{Li} + {T_{La}}^2}\right| \Delta T_{Li}\end{aligned}$$

<u>Für die Berechnung werden die Messwerte der Messung 1 herangezogen:</u>

gemittelte Innentemperatur: 33,5

gemittelte Außentemperatur: 19,7

gemittelte Wandaußentemperatur Thermofühler: 25,9

<u>Als Korrekturfaktoren werden die oben bestimmten Werte eingesetzt:</u>

ΔT_{Li}= 0,066 ΔT_{La}= 0,117 ΔT_{Wa}= 0,025 Wärmebildkamera ΔT_{Wa}= 0,052
$\Delta ha = \pm\, 0{,}008.$

Die Fehlerfortpflanzung wird dabei einmal mit dem Vertrauensbereich, der für die Messung der Wandaußentemperatur mit dem Thermofühler ermittelt wurde und mit dem Vertrauensbereich, der mit durch die Messung mit der Wärmebildkamera ermittelt wurde, berechnet.

Mit den eingesetzten Werten, die mit dem Thermofühler gemessen werden, ergibt sich durch die Fehlerfortpflanzungsgleichung ein Gesamt-Fehler für den Wärmedurchgangskoeffizienten U von:

$$\Delta U = 0{,}073 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Damit ergibt sich ein U-Wert von:

$$U = 3{,}7 \ \pm 0{,}073 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Wird die Fehlerfortpflanzung mit den Korrekturwerten der Wärmebildkamera berechnet, so ergibt sich ein Wert für ΔU von:

$$\Delta U = 0{,}090 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$U = 3{,}7 \ \pm 0{,}090 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

In Abbildung 36 sind die ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten zusammenfassend dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die ermittelten Werte, sowohl mit der Wärmebildkamera als auch mit dem Thermofühler ermittelten Werte um maximal 0,2 W/(m²K) schwanken. Mit dieser Genauigkeit ist eine ganz genaue Ermittlung des U-Wertes zwar nicht möglich, aber die Werte liegen dennoch in einem Bereich, der als gut eingestuft wird.
Die Werte, die mit der Wärmebildkamera ermittelt werden unterscheiden sich auch nicht wesentlich von denen, die mit dem Thermofühler ermittelt werden. Auch stimmt die theoretisch bestimmte Wandaußentemperatur relativ genau mit den, sowohl mit der Wärmebildkamera als auch mit dem Thermofühler ermittelten Außentemperaturen überein. Deshalb kann die Wärmebildkamera ohne Probleme für diesen Versuch als Messinstrument eingesetzt werden, wenn mindestens 30 Werte aufgenommen und gemittelt werden.

Der Literaturwert für den Wärmedurchgangskoeffizient liegt um 0,2 W/(m²K) höher als der ermittelte, durchschnittliche Wert. Dies lässt auf einen zu hoch angenommenen Wert für die Wärmeleitfähigkeit zurückführen, was beispielsweise an der etwas verschiedenen Herstellung sowie der Materialität der Modellziegelsteine, im Vergleich zu den üblichen Ziegelsteinen liegen könnte. Um hier aber genaue Aussagen treffen zu können, wären weitergehende Untersuchungen notwendig.

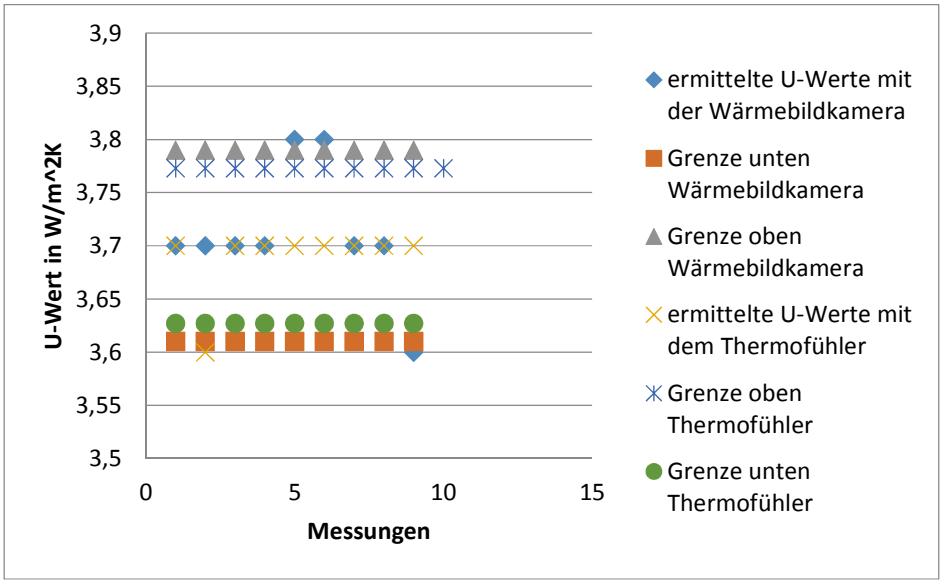


Abbildung 36: Zusammenfassende Darstellung der ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten mit den errechneten Grenzen.

4.4.2.3 Messwerte der Ziegelwand mit EPS-Außendämmung

Bei der Vermessung der Ziegelwand mit nachträglicher Außendämmung durch eine EPS-Platte ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient von:

$$U = 1{,}2\ W/(m^2K)$$

Der Effekt der nachträglichen Dämmung ist also eindeutig erkennbar, auch wenn der Wert nicht mit dem berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten aus der Literatur übereinstimmt. Dies kann wiederrum einmal auf die Materialität der Ziegelsteine, wie oben beschrieben, zurück geführt werden und andererseits darauf, dass die EPS-Platte nur mit einem Klettverschluss an der Ziegelwand befestigt wird, um diese gegebenenfalls abnehmen zu können. Leider ist es nicht möglich, die EPS-Platte ganz luftundurchlässig zu fixieren.

4.4.2.4 Messwerte für das Fenster

Bei der Vermessung der Plexiglasflächen des Fensters ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient von:

$$U = 2{,}6\ W/(m^2K)$$

Der ermittelte Durchgangskoeffizient für das Fenster entspricht zwar nicht ganz dem Wert aus der Literatur, der für eine Spaltbreite von 7 mm mit etwa $3\ W/(m^2K)$ angebenen wird, aber liegt dennoch in einem guten Bereich.

4.4.2.5 Theoretische Berechnungen zur Holzwand mit Holzfaserdämmung

Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten h_i.

Wie oben erläutert werden der minimale und der maximale Wert für hi bestimmt:

Temperatur innen in °C	Temperatur Wand innen Ziegel in °C	Temperatur Wand innen Holz in °C	h_K in W/(m²K)	h_S in W/(m²K)
33,6	29,68	32,38	2,88	6,17
33,5	29,22	32,35	2,96	6,16

Tabelle 19: Werte zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten innen an der Holzwand mit Holzfaserdämmung.

Damit ergibt sich ein maximaler Wert h_{imax}= 2,88 W/(mK) + 6,17 W/(mK) = 9,05 W/(mK)

und ein minimaler Wert h_{imin} = 2,96 W/(mK) + 6,16 W/(mK) = 9,12 W/(mK),

was im Mittel einem h_i = 9,085 W/(mK) R_i=0,11 entspricht.

Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten h_a.

Wie oben erläutert wird der Durchschnittswert für den Wärmedurchgangskoeffizienten h_a und dessen Standardabweichung bestimmt:

Temperatur außen in °C	Temperatur Wand außen Holz in °C	h_K in W/(m²K)	h_S in W/(m²K)	h_a in W/(m²K)
19,7	19,78	1,54	5,73	7,27
19,35	19,71	1,27	5,73	7
19,3	19,86	1,66	5,73	7,39
19,4	19,93	1,53	5,73	7,26
19,5	20,02	1,73	5,74	7,47
19,3	19,60	1,72	5,72	7,44
19,2	19,33	1,74	5,72	7,46
19,3	19,75	1,43	5,73	7,16
19,7	19,75	1,54	5,73	7,27

Tabelle 20: Werte zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten außen an der Holzwand mit Holzfaserdämmung.

Durch Mitteln der errechneten Wärmedurchgangskoeffizienten ergibt sich ein Wert von:

$$h_a = 7{,}30 \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$

Ohne Einbezug des systematischen Fehlers liegt somit ein Fehler bzw. ein Messbereich von:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x$$

$$x = (7{,}3 \pm 0{,}090) \text{ W/(m}^2\text{K) vor.}$$

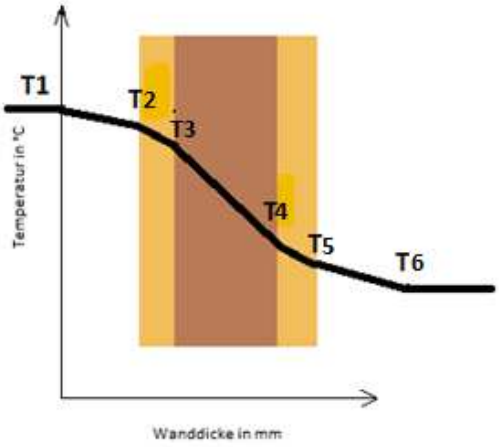
Berechnung der theoretischen U-Werte

Aus den in Kapitel 4.2.4.2 genannte Wärmeleitfähigkeiten werden die Werte für den Wärmedurchgangskoeffizienten wie oben beschrieben berechnet.

Für die Holzwand mit Holzfaser-Dämmung ergibt sich ein Wert für den Wärmedurchgangskoeffizienten von:

U = 0,45 W/m²K

Berechnung des Temperatur-Orts-Diagramms der Holzwand mit Holzfaserdämmung



Für die Berechnung werden für die Innen- und Außentemperatur gemittelte Werte verwendet, damit diese Werte zum Vergleich mit den praktische ermittelten Wandinnen- und Wandaußentemperaturen herangezogen werden können:

Abbildung 37:Temperatur-Orts-Diagramm der Holzwand mit Holzfaserdämmung

T1	T2	T3	T4	T5	T6
31	30,4	29,7	20,8	20,1	19,3

Tabelle 21: Wandaußen- und Zwischentemperaturen der Holzwand mit Holzfaserdämmung

4.4.2.6 Messergebnisse für die Holzwand mit Holzfaserdämmung:

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Messung an der Holzwand mit Holzfaserdämmung vorgestellt.

In Tabelle 22 werden die Wärmedurchgangskoeffizienten, bei denen in die Berechnung die mit der Wärmebildkamera ermittelten Wandaußentemperaturen bzw. die mit dem Thermofühler ermittelten Wandaußentemperaturen eingehen, verglichen.

Messaufnahme	Wärmebildkamera	Thermofühler
1	0,22	0,25
2	0,20	0,21
3	0,32	0,36
4	0,25	0,34
5	0,35	0,35
6	0,38	0,16
7	0,11	0,10
8	0,13	0,29
Mittelwert	**0,25**	**0,26**

Tabelle 22: ermittelte Wärmedurchgangskoeffizienten, gemessen mit der Wärmebildkamera bzw. dem Thermofühler für die Holzwand mit Holzfaserdämmung.

Fehlerfortpflanzung Wärmedurchgangskoeffizient:

Um die oben aufgeführten Werte auf ihre Qualität hin beurteilen zu können, wird anhand der ermittelten Temperaturen mit Hilfe der Standardabweichung der Korrekturwert bestimmt und eine Fehlerfortpflanzungs-Rechnung durchgeführt.

Standardabweichung der Innentemperaturen und Außentemperaturen:

Zunächst wird die Standardabweichung der gemessenen Innen- und Außentemperaturen ermittelt:

	Innentemperaturen gemittelt	Außentemperaturen gemittelt
1	31	19,7
2	31,3	19,35
3	31,4	19,3
4	31,4	19,4
5	31,4	19,5
6	31,4	19,3
7	31,3	19,2
8	31,33	19,3
Standardabweichung	**0,127**	**0,146**

Tabelle 23: gemittelte Innen-und Außentemperaturen zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Holzwand mit Holzfaserdämmung.

Die Berechnung des Vertrauensbereichs wird wie oben angeben berechnet und in der Tabelle 24 zusammengetragen.

Auf dieselbe Weise wird auch mit den Wandaußentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und mit dem Thermofühler verfahren.
In der folgenden Tabelle werden die gemittelten Werte der Wandaußentemperaturen über die Messungen und deren Standardabweichungen aufgelistet:

	Wandaußentemperatur mit Thermofühler gemittelt	Wandaußentemperatur mit Wärmebildkamera gemittelt
1	19,78	19,81
2	19,71	19,68
3	19,86	19,83
4	19,93	19,79
5	20,02	19,91
6	19,60	19,95
7	19,33	19,34
8	19,75	19,48
Standardabweichung	0,200	0,199

Tabelle 24: gemittelte Wandaußentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Holzwand mit Holzfaserdämmung.

Bei der Vermessung der Holzfaserwand liegen bei der Ermittlung mit dem Thermofühler und der Wärmebildkamera nahezu die gleichen Schwankungen vor.

Wie in der Abbildung zu sehen ist, unterliegen die Temperatur-Werte der Außenwand Schwankungen um bis zu 0,1 °C jedoch können diese Schwankung über die Mittelung der aufgenommenen Messwerte weitgehend ausgeglichen werden. Zusätzlich liegt bei der Messung mit dem Thermofühler ein Anstieg der Temperatur von etwa 0,1 °C vor. Dies wird, wie oben bereits erläutert wahrscheinlich durch die Person, die die Messungen aufnimmt, verursacht.

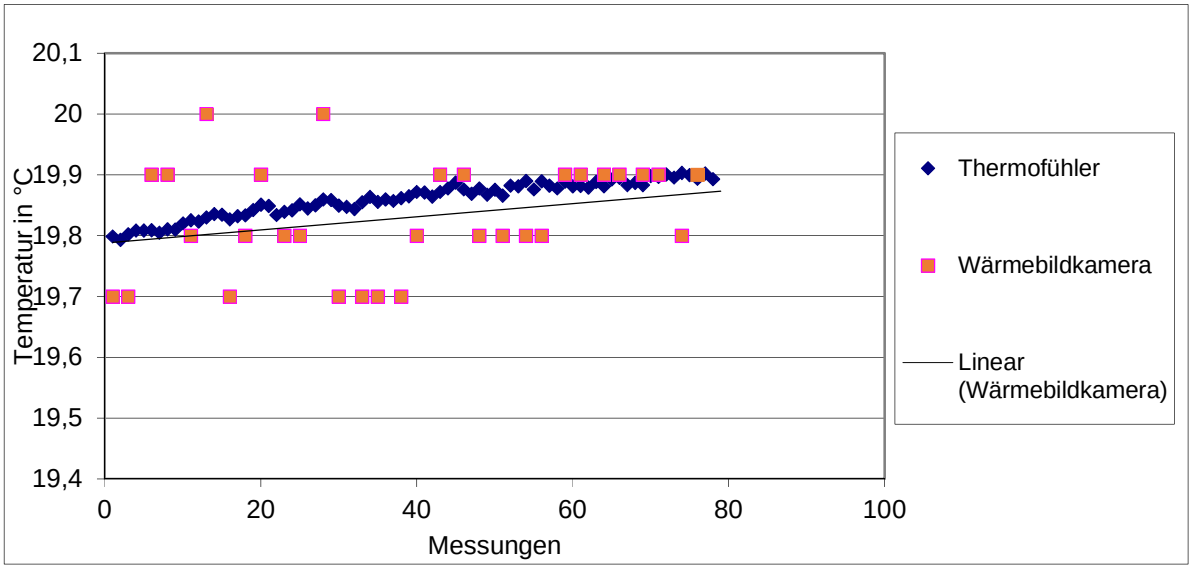


Abbildung 38: Vergleich Wärmebildkamera und Thermofühler an der Ziegelwand

	Mittelwert in °C	Standardabweichung des Mittelwerts in °C	Vertrauensbereich in °C
Innentemperatur	31,3	0,042	0,078
Außentemperatur	19,4	0,049	0,089
Wandaußentemperatur Thermofühler	19,8	0,071	0,132
Wandaußentemperatur Wärmebildkamera	19,7	0,070	0,132

Tabelle 25: Ermittlung des Vertrauensbereichs der Innen- und Außentemperaturen, sowie der Wandaußentemperaturen.

Für die Berechnung werden die Messwerte der Messung 1 herangezogen:

gemittelte Innentemperatur: 30,2

gemittelte Außentemperatur: 19,5

gemittelte Wandaußentemperatur Thermofühler: 19,8

Als Korrekturfaktoren werden die oben bestimmten Werte eingesetzt:

ΔT_{Li}= 0,078 ΔT_{La}= 0,089 ΔT_{Wa}= 0,132 Wärmebildkamera ΔT_{Wa}= 0,132 $\Delta ha =$ 0,090.

Mit den eingesetzten Werten in die Fehlerfortpflanzungsgleichung ergibt sich ein Gesamt-Fehler für den Wärmedurchgangskoeffizienten U bei mit dem Thermofühler gemessener Wandaußentemperatur von:

$$\Delta U = 0{,}096 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Damit ergibt sich ein U-Wert von:

$$U = 0{,}26 \pm 0{,}096 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Wird die Fehlerfortpflanzung mit den Korrekturwerten der Wärmebildkamera gemessen, so ergibt sich ein Wert für ΔU von:

$$\Delta U = 0{,}096 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$U = 0{,}25 \pm 0{,}096 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

In Abbildung 39 sind die U-Werte, ermittelt mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zusammenstellend dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die ermittelten Werte relativ große Streuungen aufweisen und um bis zu fast 0,3 W/(m²K). Dies kann beispielsweise auf Grund von großen Temperaturschwankungen der Außentemperatur entstehen, oder durch das Erwärmen der Wand während der Messung durch die versuchsdurchführende Person. Mit dieser Genauigkeit ist eine ganz genaue Ermittlung des U-Wertes zwar nicht möglich, aber die Werte liegen dennoch in einem Bereich, der als gut eingestuft werden kann und somit im Versuch zumindest qualitative Aussagen getroffen werden können.
Die Werte, die mit der Wärmebildkamera ermittelt werden, unterscheiden sich auch nicht wesentlich von denen, die mit dem Thermofühler ermittelt werden. Auch stimmt die theoretisch bestimmte Wandaußentemperatur relativ genau mit den ermittelten Außentemperaturen, sowohl mit der Wärmebildkamera als auch mit dem Thermofühler, überein. Damit kann die Wärmebildkamera ohne Probleme für die Vermessung der Holzwand mit Holzfaserdämmung als Messinstrument eingesetzt werden, wenn mindestens 30 Werte aufgenommen und gemittelt werden.

Der Literaturwert für den Wärmedurchgangskoeffizient liegt um 0,19 W/(m²K) höher als der ermittelte, durchschnittliche Wert. Dies lässt auf einen zu hoch angenommenen Wert für die Wärmeleitfähigkeit der Holzfaserdämmplatte bzw. dem Fichtenholz zurückführen, denn die genaue Wärmeleitfähigkeit der eingesetzten Holzfaserdämmplatte ist nicht bekannt. Um hier aber genaue Aussagen treffen zu können, wären weitergehende Untersuchungen notwendig.

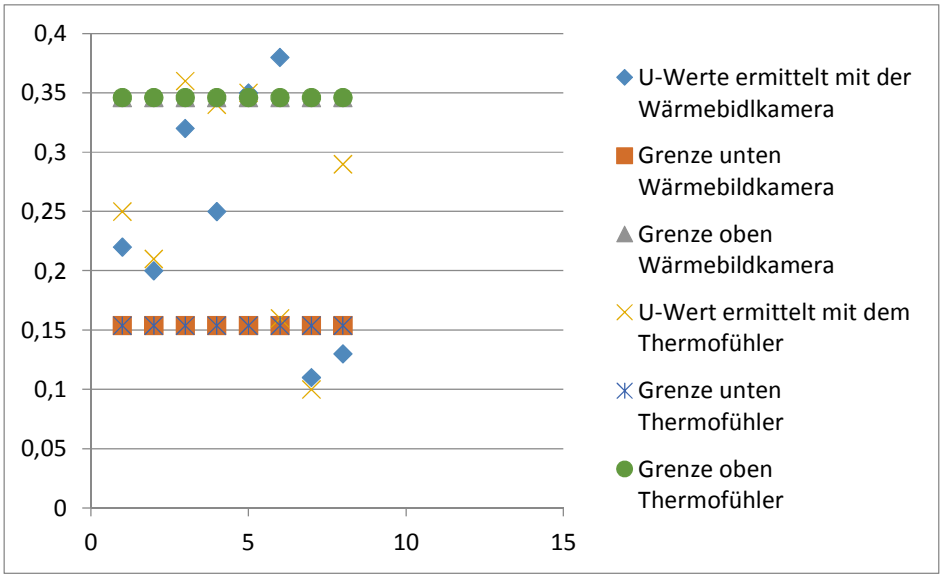


Abbildung 39: Zusammenfassende Darstellung der ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten mit den errechneten Grenzen.

4.4.2.7 Theoretische Berechnungen zur Holzwand gedämmt mit EPS

Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten h_i.

Wie oben erläutert werden der minimale und der maximale Wert für h_i bestimmt:

Temperatur innen in °C	Temperatur Wand innen Ziegel in °C	Temperatur Wand innen Holz in °C	h_K in W/(m²K)	h_S in W/(m²K)
33,7	32,1	30,4	2,25387692	6,26039425
33,3	32,0	30,3	2,13238023	6,22340749

Tabelle 26: Messwerte zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten innen für die Holzwand mit EPS-Dämmung

Damit ergibt sich ein maximaler Wert h_{imax}= 2,35W/(mK) + 6,26 W/(mK) = 8,61 W/(mK)

und ein minimaler Wert h_{imin} = 2,13 W/(mK) + 6,22 W/(mK) = 8,35 W/(mK),

was im Mittel einem h_i = 8,48 W/(mK) R_i=0,12 entspricht.

Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten h_a.

Wie oben erläutert wird der Durchschnittswert für den Wärmedurchgangskoeffizienten h_a und dessen Standardabweichung bestimmt:

Temperatur außen in °C	Temperatur Wand außen Holz in °C	h_K in W/(m²K)	h_S in W/(m²K)	h_a in W/(m²K)
21,4	20,7	1,878	5,76	7,638
21,4	20,7	1,87	5,76	7,63
21,4	20,5	1,96	5,75	7,71
21,5	20,6	1,92	5,75	7,67
21,5	20,5	1,98	5,75	7,73
21,5	20,7	1,93	5,76	7,69
21,6	20,7	1,96	5,76	7,72
21,6	20,5	1,99	5,75	7,74

Tabelle 27: Messwerte zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten außen für die Holzwand mit EPS-Dämmung

Durch Mitteln der errechneten Wärmedurchgangskoeffizienten ergibt sich ein Wert von:

h_a = 7,69 W/(m²K).

Ohne Einbezug des systematischen Fehlers ergibt sich somit ein Fehler bzw. ein Messbereich von:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x$$

$$x = (7{,}69 \pm 0{,}026) \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Berechnung der theoretischen U-Werte

Aus den in Kapitel 4.2.4.1 genannten Wärmeleitfähigkeiten werden die Werte für den Wärmedurchgangskoeffizienten wie oben beschrieben berechnet.

Für die Holzwand mit EPS-Dämmung ergibt sich ein Wert für den Wärmedurchgangskoeffizienten von:

$$U = 0{,}47\ W/m^2K$$

Berechnung des Temperatur-Orts-Diagramms der EPS

Für die Berechnung werden für die Innen- und Außentemperatur gemittelte Werte verwendet, damit diese Werte zum Vergleich mit den praktische ermittelten Wandinnen- und Wandaußentemperaturen herangezogen werden können:

<u>Theoretische Berechnung der Wandtemperaturen:</u>

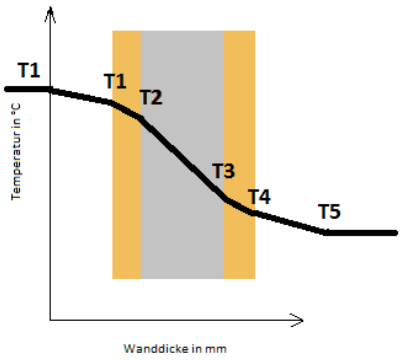


Abbildung 40: Temperatur-Orts-Diagramm der Holzwand mit EPS-Dämmung.

Für die Berechnung werden für die Innen- und Außentemperatur gemittelte Werte verwendet, damit diese Werte zum Vergleich mit den praktische ermittelten Wandinnen- und Wandaußentemperaturen herangezogen werden können:

T1	T2	T3	T4	T5	T6
33,5	32,7	31,93	22,2	21,4	20,6

Tabelle 28: Wandaußen- und Zwischentemperaturen der Holzwand mit EPS-Dämmung.

4.4.2.8 Messergebnisse für die Holzwand mit EPS-Dämmung:

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Messung an der Holzwand mit EPS-Dämmung vorgestellt.

In Tabelle 29 werden die U-Werte, bei denen in die Berechnung die mit der Wärmebildkamera ermittelten Wandaußentemperaturen und die mit dem Thermofühler ermittelten Wandaußentemperaturen, verglichen.

Messaufnahme	Wärmebildkamera	Thermofühler
1	0,39	0,46
2	0,41	0,46
3	0,55	0,55
4	0,51	0,50
5	0,53	0,57
6	0,56	0,51
7	0,54	0,55
8	0,62	0,56
Mittelwert	**0,51**	**0,52**

Tabelle 29: ermittelte Wärmedurchgangskoeffizienten, gemessen mit der Wärmebildkamera bzw. dem Thermofühler für die Holzwand mit EPS-Dämmung.

Fehlerfortpflanzung Wärmedurchgangskoeffizient

Um die oben aufgeführten Werte auf ihre Qualität hin beurteilen zu können, wird anhand der ermittelten Temperaturen mit Hilfe der Standardabweichung der Korrekturwert bestimmt und eine Fehlerfortpflanzungs-Rechnung durchgeführt.

Vertrauensbereich der Innentemperaturen und Außentemperaturen

Zunächst wird die Standardabweichung der gemessenen Innen- und Außentemperaturen ermittelt:

	Innentemperaturen gemittelt	**Außentemperaturen gemittelt**
1	33,5	20,7
2	33,5	20,7
3	33,3	20,5
4	33,6	20,6
5	33,4	20,5
6	33,5	20,7
7	33,5	20,7
8	33,7	20,5
Standardabweichung	**0,11**	**0,09**

Tabelle 30: gemittelte Innen-und Außentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Holzwand mit EPS-Dämmung.

Die Berechnung des Vertrauensbereichs wird wie oben angeben berechnet und in der Tabelle 31 zusammengetragen.

Auf dieselbe Weise wird auch mit den Wandaußentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und mit dem Thermofühler verfahren.
In der folgenden Tabelle werden die gemittelten Werte über die Messungen und deren Standardabweichungen aufgelistet:

Bei der Vermessung der Holzwand mit EPS-Dämmung liegt bei der Ermittlung mit dem Thermofühler und der Wärmebildkamera nahezu die gleiche Standardabweichung vor.

Wie in Abbildung 41 zu sehen ist, unterliegen die Temperatur-Werte der Außenwand Schwankungen um bis zu 0,3 °C jedoch können diese Schwankung über die Mittelung der aufgenommenen Messwerte weitgehend ausgeglichen werden. Zusätzlich liegt bei der Messung mit dem Thermofühler ein Anstieg der Temperatur von etwa 0,1 °C vor.

	Wandaußentemperatur mit Thermofühler gemittelt	Wandaußentemperatur mit Wärmebildkamera gemittelt
1	21,4	21,3
2	21,4	21,4
3	21,4	21,4
4	21,5	21,5
5	21,5	21,4
6	21,5	21,6
7	21,6	21,5
8	21,6	21,6
Standardabweichung	**0,07806247**	**0,09921567**

Tabelle 31: gemittelte Wandaußentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Holzwand mit EPS-Dämmung.

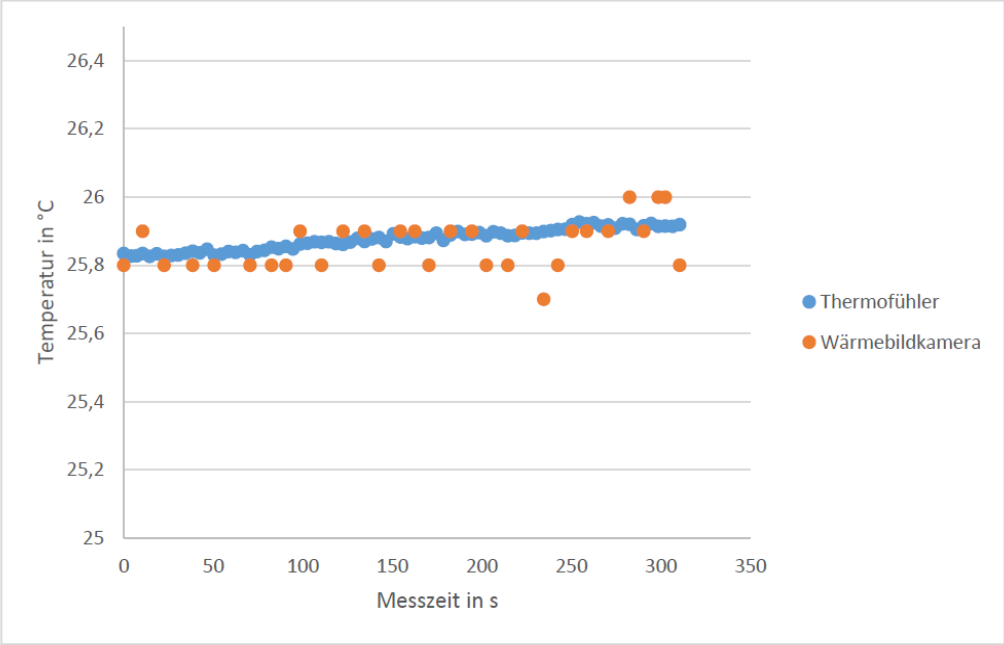


Abbildung 41: Vergleich Wärmebildkamera und Thermofühler an der Holzwand mit EPS-Dämmung.

	Mittelwert in °C	Standardabweichung des Mittelwerts in °C	Vertrauensbereich in °C
Innentemperatur	33,5	0,040	0,074
Außentemperatur	20,6	0,033	0,061
Wandaußentemperatur Thermofühler	21,5	0,028	0,052
Wandaußentemperatur Wärmebildkamera	21,5	0,035	0,066

Tabelle 32: Ermittlung des Vertrauensbereichs der Innen- und Außentemperaturen, sowie der Wandaußentemperaturen.

Für die Berechnung werden die Messwerte der Messung 1 herangezogen:

gemittelte Innentemperatur: 33,5

gemittelte Außentemperatur: 20,6

gemittelte Wandaußentemperatur Thermofühler: 21,5

Als Korrekturfaktoren werden die oben bestimmten Werte eingesetzt:

ΔT_{Li}= 0,074 ΔT_{La}= 0,061 ΔT_{Wa}= 0,052 Wärmebildkamera ΔT_{Wa}= 0,066 $\Delta ha = 0{,}026$.

<u>Fehlerfortpflanzung mit Thermofühler an Außenwand:</u>

Nun wird die Fehlerfortpflanzung zunächst für die mit dem Thermofühler gemessenen Messwerten berechnet und danach wird der Korrekturwert der für die Aufnahme mit der Wärmebildkamera berechnet wurde, eingesetzt, um so den Fehler, der durch die Wärmebildkamera vorliegt, einschätzen zu können.

$$\Delta U = 0{,}039 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Damit ergibt sich ein U-Wert von:

$$U = 0{,}52 \pm 0{,}039 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Wird die Fehlerfortpflanzung mit den Korrekturwerten der Wärmebildkamera gemessen, so ergibt sich ein Wert für ΔU von:

$$\Delta U = 0{,}047 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$U = 0{,}51 \pm 0{,}047 \text{W/(m}^2\text{K)}$$

In Abbildung 42 sind die U-Werte, ermittelt mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler, zusammenstellend dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die ermittelten Werte relativ große Streuungen aufweisen und um bis zu fast 0,3 W/(m²K). Dies kann beispielsweise auf Grund von großen Temperaturschwankungen der Außentemperatur entstehen, oder durch das Erwärmen der Wand während der Messung durch die Person, die den Versuch druchführt. Mit dieser Genauigkeit ist eine ganz genaue Ermittlung des U-Wertes zwar nicht möglich, aber die Werte liegen dennoch in einem Bereich, der als gut eingestuft werden kann und somit im Versuch zumindest qualitative Aussagen getroffen werden können. Die Werte die mit der Wärmebildkamera ermittelt werden unterscheiden sich auch nicht wesentlich von denen, die mit dem Thermofühler ermittelt werden. Auch stimmt die theoretisch bestimmte Wandaußentemperatur relativ genau mit den ermittelten

Außentemperaturen, sowohl mit der Wärmebildkamera als auch mit dem Thermofühler, überein. Damit kann die Wärmebildkamera ohne Probleme für diesen Versuch als Messinstrument eingesetzt werden, wenn mindestens 30 Werte aufgenommen und gemittelt werden.

Der Literaturwert für den Wärmedurchgangskoeffizient liegt um 0,04 W/(m²K) höher als der ermittelte, durchschnittliche Wert. Diese geringe Differenz kann auf Messfehler zurückgeführt werden.

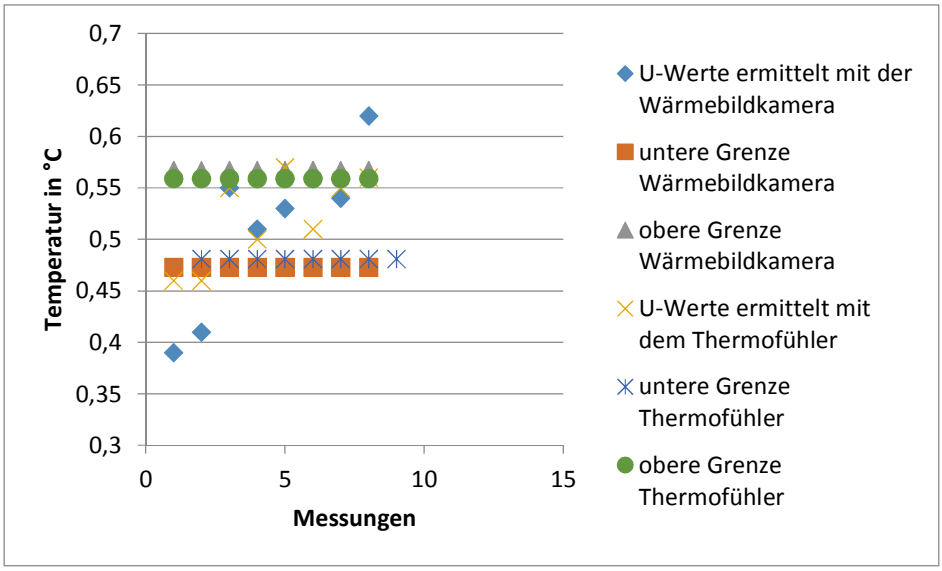


Abbildung 42: Zusammenfassende Darstellung der ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten für die Holzwand mit EPS-Dämmung mit den errechneten Grenzen.

4.4.2.9 Messwerte der Holzwand gedämmt mit EPS und Hinterlüftung

Es ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient von:

$$U = 0{,}2\ W/(m^2K)$$

Es ist also ein deutlicher Effekt durch die Anbringung der Hinterlüftung erkennbar.

4.4.2.10 Theoretische Berechnungen zur Betonwand mit StarTherm

Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten h_i.

Wie oben erläutert werden der minimale und der maximale Wert für hi bestimmt:

Temperatur innen in °C	Temperatur Wand innen Ziegel in °C	Temperatur Wand innen Holz in °C	h_K in W/(m²K)	h_S in W/(m²K)
31,9	30,4	32,1	2,21855411	6,26039425
31,6	30,3	32	2,13555761	6,25422641

Tabelle 33: Messwerte zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten innen für die Betonwand mit StarTherm-Dämmung.

Damit ergibt sich ein maximaler Wert h_{imax}= 2,22 W/(mK) + 6,26 W/(mK) = 8,48 W/(mK)

und ein minimaler Wert h_{imin} = 2,14 W/(mK) + 6,25 W/(mK) = 8,39 W/(mK),

was im Mittel einem h_i = 8,44 W/(mK) R_i=0,12 entspricht.

Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten h_a

Wie oben erläutert wird der Durchschnittswert für den Wärmedurchgangskoeffizienten h_a und dessen Standardabweichung bestimmt:

Temperatur außen in °C	Temperatur Wand außen Holz in °C	h_K in W/(m²K)	h_S in W/(m²K)	h_a in W/(m²K)
19,8	20,4	1,86	5,55	7,41
19,9	20,6	1,81	5,55	7,36
19,6	20,6	2,07	5,55	7,62
19,8	20,8	2,02	5,56	7,58
19,8	20,8	2,02	5,56	7,58
19,8	20,8	2,01	5,56	7,57
19,8	20,8	2,05	5,56	7,61
19,8	20,7	2,08	5,56	7,64
20,0	21,0	2,04	5,56	7,6

Tabelle 34: Messwerte zur Ermittlung des Wärmedruchgangskoeffizienten außen für die Betonwand mit der StarTherm-Dämmung.

Durch Mitteln der errechneten Wärmedurchgangskoeffizienten ergibt sich ein Wert von:

$$h_a = 7{,}55 \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$

Ohne Einbezug des systematischen Fehlers ergibt sich somit ein Fehler bzw. ein Messbereich von:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x$$

$$x = (7{,}55 \pm 0{,}061) \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Berechnung der theoretischen U-Werte

Aus den in Kapitel 4.2.2 genannten Wärmeleitfähigkeiten werden die Werte für den Wärmedurchgangskoeffizienten wie oben beschrieben berechnet.

Für die Betonwand mit StarTherm-Dämmung ergibt sich ein Wert für den Wärmedurchgangskoeffizienten von:

$$U = 0{,}28 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Berechnung des Temperatur-Orts-Diagramms der Betonwand

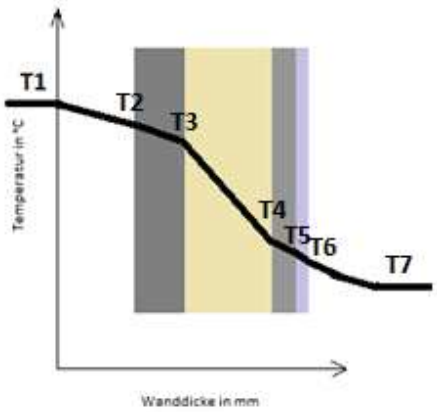


Abbildung 43: Temperatur-Orts-Diagramm der Betonwand mit StarTherm-Dämmung

Für die Berechnung werden für die Innen- und Außentemperatur gemittelte Werte verwendet, damit diese Werte zum Vergleich mit den praktische ermittelten Wandinnen- und Wandaußentemperaturen herangezogen werden können:

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
31,6	31,3	27,6	20,1	20,1	20,1	19,8

Tabelle 35: Wandaußen- und Zwischentemperaturen der Betonwand mit StarTherm-Dämmung

4.4.2.11 Messergebnisse für die Betonwand:

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Messung an der Betonwand mit StarTherm-Dämmung vorgestellt.

In Tabelle 36 werden die U-Werte, bei denen in die Berechnung die mit der Wärmebildkamera ermittelten Wandaußentemperaturen bzw. die mit dem Thermofühler ermittelten Wandaußentemperaturen, verglichen.

Messaufnahme	Wärmebildkamera	Thermofühler
1	0,42	0,47
2	0,41	0,43
3	0,63	0,70
4	0,63	0,65
5	0,68	0,65
6	0,65	0,64
7	0,69	0,69
8	0,58	0,72
9	0,67	0,67
Mittelwert	**0,60**	**0,62**

Tabelle 36: ermittelte Wärmedurchgangskoeffizienten, gemessen mit der Wärmebildkamera bzw. dem Thermofühler für die Betonwand mit StarTherm-Dämmung.

Fehlerfortpflanzung Wärmedurchgangskoeffizient

Um die oben aufgeführten Werte auf ihre Qualität hin beurteilen zu können, wird anhand der ermittelten Temperaturen mit Hilfe der Standardabweichung der Korrekturwert bestimmt und eine Fehlerfortpflanzungs-Rechnung durchgeführt.

Vertrauensbereich der Innentemperaturen und Außentemperaturen

Zunächst wird die Standardabweichung der gemessenen Innen- und Außentemperaturen ermittelt:

	Innentemperaturen gemittelt	Außentemperaturen gemittelt
1	31,6	19,8
2	31,6	19,9
3	31,6	19,6
4	31,5	19,8
5	31,5	19,8
6	31,5	19,8
7	31,6	19,8
8	31,8	19,8
9	31,9	20,0
Standardabweichung	0,132	0,100

Tabelle 37: gemittelte Innen-und Außentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Betonwand mit StarTherm-Dämmung.

Die Berechnung des Vertrauensbereichs wird wie oben angeben berechnet und in der Tabelle 39 zusammengetragen.

Auf dieselbe Weise wird auch mit den Wandaußentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und mit dem Thermofühler verfahren.

In der folgenden Tabelle werden die gemittelten Werte über die Messungen und deren Standardabweichungen aufgelistet:

	Wandaußentemperatur mit Thermofühler gemittelt	Wandaußentemperatur mit Wärmebildkamera gemittelt
1	20,4	20,5
2	20,6	20,6
3	20,6	20,7
4	20,8	20,8
5	20,8	20,8
6	20,8	20,8
7	20,8	20,9
8	20,7	20,9
9	21,0	21
Standardabweichung	0,162	0,147

Tabelle 38: gemittelte Wandaußentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Betonwand mit StarTherm-Dämmung.

Bei der Vermessung der Betonwand liegen bei der Ermittlung mit dem Thermofühler und der Wärmebildkamera nahezu die gleichen Schwankungen vor.

Wie in Abbildung zu sehen ist, unterliegen die Temperatur-Werte der Außenwand Schwankungen um bis zu 0,1 °C jedoch können diese Schwankung über die Mittelung der aufgenommenen Messwerte weitgehend ausgeglichen werden. Zusätzlich liegt bei der Messung mit dem Thermofühler ebenso ein Anstieg der Temperatur von etwa 0,1 °C vor.

	Mittelwert in °C	**Standardabweichung des Mittelwerts in °C**	**Vertrauensbereich in °C**
Innentemperatur	31,5875	0,046481113	0,086454869
Außentemperatur	19,7875	0,035136418	0,065353738
Wandaußentemperatur Thermofühler	20,6875	0,057197945	0,106388178
Wandaußentemperatur Wärmebildkamera	20,75	0,052115731	0,096935259

Tabelle 39: Ermittlung des Vertrauensbereichs der Innen- und Außentemperaturen, sowie der Wandaußentemperaturen.

Für die Berechnung werden die Messwerte der Messung 1 herangezogen:

gemittelte Innentemperatur: 31,6

gemittelte Außentemperatur: 19,8

gemittelte Wandaußentemperatur Thermofühler: 20,4

Als Korrekturfaktoren werden die oben bestimmten Werte eingesetzt:

ΔT_{Li}= 0,087 ΔT_{La}= 0,065 ΔT_{Wa}= 0,106 Wärmebildkamera ΔT_{Wa}= 0,097 $\Delta ha = \pm\ 0{,}061.$

Mit den eingesetzten Werten in die Fehlerfortpflanzungsgleichung ergibt sich ein Gesamt-Fehler für den Wärmedurchgangskoeffizienten U bei mit dem Thermofühler gemessener Wandaußentemperatur von:

$$\Delta U = 0{,}076 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Damit ergibt sich ein U-Wert von:

$$U = 0{,}62 \pm 0{,}076 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Wird die Fehlerfortpflanzung mit den Korrekturwerten der Wärmebildkamera gemessen, so ergibt sich ein Wert für ΔU von:

$$\Delta U = 0{,}070 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

$$U = 0{,}6 \pm 0{,}070 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

In Abbildung 44 sind die Wärmedurchgangswerte, ermittelt mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zusammenstellend dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die ermittelten Werte relativ große Streuungen aufweisen und um bis zu fast 0,3 W/(m²K). Dies kann beispielsweise auf Grund von großen Temperaturschwankungen der Außentemperatur entstehen, oder durch das Erwärmen der Wand während der Messung durch die versuchsdurchführende Person. Mit dieser Genauigkeit ist eine ganz genaue Ermittlung des U-Wertes zwar nicht möglich, aber die Werte liegen dennoch in einem Bereich, der als gut eingestuft werden kann und somit im Versuch zumindest qualitative Aussagen getroffen werden können.
Die Werte die mit der Wärmebildkamera ermittelt werden unterscheiden sich auch nicht wesentlich von denen, die mit dem Thermofühler ermittelt werden. Auch stimmt die theoretisch bestimmte Wandaußentemperatur in etwa mit den ermittelten Außentemperaturen, sowohl mit der Wärmebildkamera als auch mit dem Thermofühler, überein. Damit kann die Wärmebildkamera ohne Probleme für diesen Versuch als Messinstrument eingesetzt werden, wenn mindestens 30 Werte aufgenommen und gemittelt werden.

Der Literaturwert für den Wärmedurchgangskoeffizient liegt um 0,32 W/(m²K) niedriger als der ermittelte, durchschnittliche Wert. Dies lässt auf einen zu niedrig angenommenen Wert für die Wärmeleitfähigkeit zurückführen, denn die genaue Wärmeleitfähigkeit der Betonplatte ist nicht bekannt. Um hier aber genaue Aussagen treffen zu können, wären weitergehende Untersuchungen notwendig.

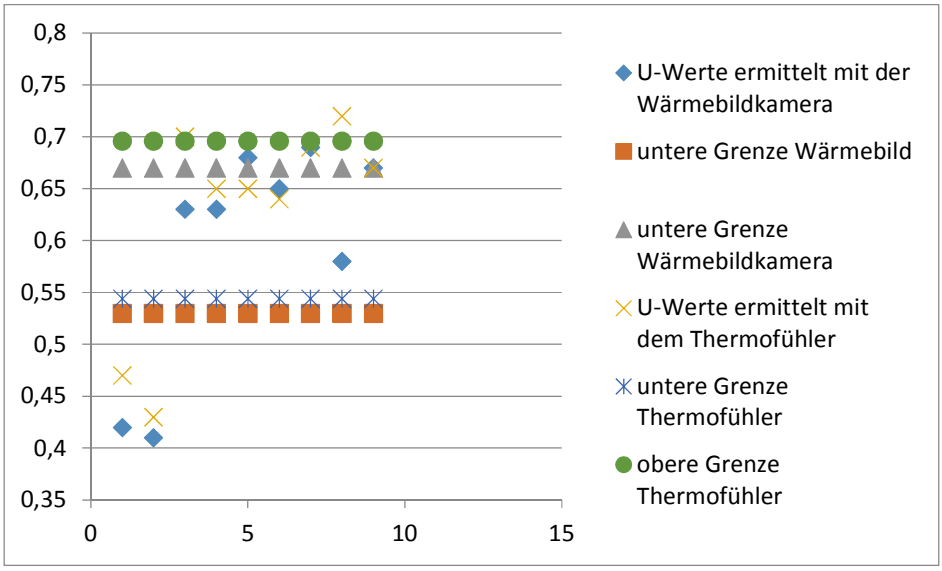


Abbildung 44: Zusammenfassende Darstellung der ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten für die Betonwand mit der Star-Therm-Dämmung mit den errechneten Grenzen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Thermohaus für einen Laborversuch des Energietechnikpraktikums entwickelt und aufgebaut anhand dessen Studentinnen und Studenten einen Einblick in die üblichen Wandaufbauten hinsichtlich der Relevanz von Dämmsystemen bekommen können, mit dem Ziel das Bewusstsein der Studentinnen und Studenten zu schärfen. Weiterhin ermöglicht der Versuch ihnen die Messung an Gebäuden mit der Wärmebildkamera kenne zu lernen.

Es konnte ein Messverfahren, das eine relativ genaue Messung ermöglicht, mit der Wärmebildkamera entwickelt werden. Im Auswertungsteil wird deutlich, dass eine exakte Vermessung und Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten unter den gegebenen Umweltbedingungen nicht möglich ist. Trotzdem können Werte für den Wärmedurchgangskoeffizienten bestimmt werden, die in einem als gut einzustufenden Bereich liegen. Dadurch können die unterschiedlichen Wände mit ihren Dämmsystemen qualitativ eingestuft werden. Ein großes Problem bei der Vermessung des Thermohauses stellen die Umweltbedingungen dar. Um also eine genauere Messung zu erreichen, müssen folgende Komponenten wie Temperaturschwankungen berücksichtigt werden, denn ein großes Problem stellen die Schwankungen der Temperaturen innerhalb aber auch zwischen den Messungen im Laborraum dar. Dieses Problem könnte verringert werden, indem in einem gut temperierten Raum gearbeitet wird. Es ist auch vorstellbar den Versuch in einer Kühlkammer durchzuführen. Hierbei müsst das Haus von innen, um die Temperaturdifferenz von mindestens 10 °C zu erhalten, nicht so stark geheizt werden. Dies würde auch eher den Bedingungen entsprechen, unter denen eine Messung an einem Gebäude mit der Wärmebildkamera zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten üblicherweise durchgeführt wird.

Zudem wäre es sinnvoll die Messungen mit einer Kamera durchzuführen, welche einen Selbstauslöser besitzt und auf einem Stativ befestigt werden kann. Die versuchsdurchführende Person könnte dann während der Messung den Raum verlassen und würde damit nicht die Raumtemperatur und die Erwärmung der Wandaußenseite während der Messung beeinflussen.

Um die Innentemperatur noch konstanter zu halten wäre es vorstellbar einen Thermostat im Haus anzubringen der bei einer bestimmten Temperatur bzw. 33 °C die Wasserpumpe ausstellt und nach Unterschreiten dieser Temperatur wieder einschaltet.

Im vorgestellten Versuch wird der stationäre Zustand des Thermohauses untersucht. Interessant wäre es aber auch den Nichtstationären Zustand näher zu untersuchen. Dies könnte entweder durch die Messung während des Aufheizens mit der Wasserheizung durchgeführt werden oder indem ein nachträgliches Heizen von außen vorgenommen wird, beispielsweise durch die Sonne.

Es ist auch denkbar dem Aufbau des Thermohauses eine andere Konzeption zugrunde zu legen. Beispielsweise könnte das Haus nur aus einer Wandaufbauweise verwirklicht werden, wie zum Beispiel der Holzrahmenbauweise, welche dann mit unterschiedlichen Dämmstoffen gefüllt wird. So wäre ein direkter Vergleich der unterschiedlichen Dämmstoffe möglich.

Zudem könnten auch statt der Flächenheizung am Boden Kompaktheizungen verwirklicht werden, wobei dann die Wärmeströmung im Haus näher betrachtet werden könnte. Auch mit dem Einbau einem Stockwerkboden könnten Untersuchungen zur Wärmeverteilung im Haus durchgeführt werden. Hierbei könnte auch untersucht werden welche Folgen es hat, wenn das Haus nur im oberen bzw. unteren Geschoss beheizt wird.

Auch für die Schule ist ein Aufbau einen solchen Thermohauses durchaus denkbar, denn es kann aus kostengünstigen Materialien und ohne großen Maschinenaufwand aufgebaut werden. Denkbar wäre es auch das Thermohaus in Gruppenarbeit aufbauen zu lassen, wobei jede Gruppe für den Aufbau einer Wand verantwortlich ist. Somit könnten für den Arbeitsalltag wichtige Kompetenzen zum Projektmanagament erworben werden.

6. Verzeichnisse

6.1 Abkürzungsverzeichnis

EPS	Expandiertes Polystyrol
FPA	Focal Plane Array
HgCdTe	Quecksilber-Cadmium-Tellurid
InSb	Indiumantimonid
IR	Infrarot
NEH	Niedigenergiehaus
PH	Passivhaus
PbS	Bleisulfid
PbSe	Bleiselenid

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Statistik der AGEB und der BDEW zum Energieverbrauch in Deutschland 2012 (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2014). 4
Abbildung 2: Das elektromagnetische Spektrum (Fouad und Richter 2012, S. 10). 9
Abbildung 3: Modellvorstellung eines schwarzen Körpers (nach Fouad und Richter 2012, S.11)... 10
Abbildung 4: Plancksches Stahlungsgesetz (Fouad und Richter 2012, S. 12). 11
Abbildung 5: Mögliche Wechselwirkungen der auftreffenden Strahlung auf einem realen Körper (Fouad und Richter 2012, S. 15). 12
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Bilderzeugung einer FPA-Kamera (nach Fouad und Richter 2012, S. 52). 20
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Bilderzeugung einer stickstoffgefüllten Scannerkamera (nach Fouad und Richter 2012, S.48). 20
Abbildung 8: Prinzipieller Aufbau eines thermischen Detektorelements (nach Wallrabe 2001, S. 245). 21
Abbildung 9: Erzeugung eines Leitungselektrons durch Absorption eines Strahlungsquants oder durch Aufnahme von Wärmenergie (nach Wallrabe 2001, S. 263). 22
Abbildung 10: Temperaturverlauf in einer einschichtigen, ebenen Wand unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ (nach Häupl 2008, S. 71). 27
Abbildung 11; Temperaturverlauf in einer mehrschichtigen, ebenen Wand unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ (nach Häupl 2008, S. 71). 27
Abbildung 12: Temperaturverlauf in einer einschichtigen, ebenen Wand unter Einbezug der Wärmedurchlass-widerstände zwischen Luft und Wand (nach Häupl 2008, S. 71). 33
Abbildung 13: Übersicht der konventionellen Wärmeübergangswiderstände nach DIN EN ISO 6946 (Bogusch und Duzia 2012, S. 35). 34
Abbildung 14: Grundriss PHYWE-Themohaus. 42
Abbildung 15: Außenansicht PHYWE-Thermohaus. 42
Abbildung 16: Messung mit der Wärmebildkamera alle 10 Minuten über einen Zeitraum von 2 Stunden. 46
Abbildung 17: Schematischer Aufbau des neuen Thermohauses. 48
Abbildung 18: Thermohaus Aufbau von oben mit Fußboden-Heizung. 48
Abbildung 19: Frontansicht Ziegelwand mit und ohne zusätzliche Dämmung 49
Abbildung 20: Blockverband Ziegelsteinwand (Campbell et al. 2003, S. 305). 50
Abbildung 21: Abhängigkeit der Wärmedurchlasszahl von der Spaltbreite (Zürcher und Frank 2004, S. 33). 51
Abbildung 22: Frontansicht Betonwand. 52
Abbildung 23: Aufbau Dämmaufbau StarTherm. 53
Abbildung 24: Holzrahmenbauweise grundsätzlicher Aufbau (nach Lückmann 2009, S. 58). 55
Abbildung 25: Frontansicht Holzwand mit EPS Dämmung. 56
Abbildung 26: Frontansicht Holzwand mit Holzfaserdämmung. 57
Abbildung 27: Hinterlüftete Fassade angebracht auf einer Mauerwand (Königstein 2009, S. 49)... 59
Abbildung 28: Schematischer Zeichnung des Aufbaus der Hinterlüfteten Fassade im Versuch. 59
Abbildung 29: Überprüfung ab wann sich der stationäre Zustand an der Wandinnenseite eingestellt hat. 63
Abbildung 30: Überprüfung ab wann sich der stationäre Zustand an der Wandaußenseite eingestellt hat. 64
Abbildung 31: Temperatur-Ortsdiagramm Ziegelwand. 68
Abbildung 32: Wandaußen- und Zwischentemperaturen Ziegelwand mit EPS- Dämmung. 68

Abbildung 34: Darstellung der Innentemperaturen zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Ziegelwand. 71
Abbildung 33: Darstellung der Außentemperaturen zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Ziegelwand 71
Abbildung 35: Vergleich Wärmebildkamera und Thermofühler an der Ziegelwand siehe Messung 1 73
Abbildung 36: Zusammenfassende Darstellung der ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten mit den errechneten Grenzen. 76
Abbildung 37:Temperatur-Orts-Diagramm der Holzwand mit Holzfaserdämmung 79
Abbildung 38: Vergleich Wärmebildkamera und Thermofühler an der Ziegelwand 82
Abbildung 39: Zusammenfassende Darstellung der ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten mit den errechneten Grenzen. 84
Abbildung 40: Temperatur-Orts-Diagramm der Holzwand mit EPS-Dämmung. 86
Abbildung 41: Vergleich Wärmebildkamera und Thermofühler an der Holzwand mit EPS-Dämmung. 89
Abbildung 42: Zusammenfassende Darstellung der ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten für die Holzwand mit EPS-Dämmung mit den errechneten Grenzen. 91
Abbildung 43: Temperatur-Orts-Diagramm der Betonwand mit StarTherm-Dämmung 93
Abbildung 44: Zusammenfassende Darstellung der ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten für die Betonwand mit der Star-Therm-Dämmung mit den errechneten Grenzen. 98

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einheitliche Einteilung der Spektralbereiche nach der DIN Norm 5031-7 8
Tabelle 2: übliche Emissionsgrade im Temperaturbereich von ca. -10 °C bis 100 °C und einem Wellenlängenbereich von λ = 8-14 µm (nach Fouad und Richter 2012, S. 19). 13
Tabelle 3: ausgewählte Baustoffe mit der dazugehörigen Wärmeleitfähigkeit (vgl. Königstein 2009, S. 19). 36
Tabelle 4: ausgewählte Baustoffe mit der dazugehörigen Wärmeleitfähigkeit (vgl. Königstein 2009, S. 19). 38
Tabelle 5: U-Wert Standards für ein Niedrigenergiehaus (NEH) und ein Passivhaus (PH) 39
Tabelle 6:Messwertaufnahme Vergleich Wärmebildkamera und Thermofühler..... 44
Tabelle 7: Vergleich der Mittelwerte von drei Wärmebilder, die direkt hintereinander aufgenommen. 45
Tabelle 8: Vergleich der Werte gemessen mit der Wärmebild-kamera und dem Thermofühler über eine Zeit von 130 min. 46
Tabelle 9: Gegenüberstellung der Vor-und Nachteile von einer Kompaktheizflächen und einer Fußbodenheizung. 61
Tabelle 10: Emissionsgrade der zu untersuchenden Wandoberflächen..... 62
Tabelle 11: Messwerte zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten innen. 65
Tabelle 12: Messwerte zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten außen..... 66
Tabelle 13: Wandaußen- und Zwischentemperaturen Ziegelwand. 68
Tabelle 14: Wandaußen- und Zwischentemperaturen Ziegelwand. 68
Tabelle 15: ermittelte Wärmedurchgangskoeffizienten, gemessen mit der Wärmebildkamera bzw. dem Thermofühler für die Ziegelwand. 69
Tabelle 16: gemittelte Innen-und Außentemperaturen zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Ziegelwand. 70
Tabelle 17: gemittelte Wandaußentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Ziegelwand. 72
Tabelle 18: Ermittlung des Vertrauensbereichs der Innen- und Außentemperaturen, sowie der Wandaußentemperaturen. 73
Tabelle 19: Werte zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten innen an der Holzwand mit Holzfaserdämmung. 77
Tabelle 20: Werte zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten außen an der Holzwand mit Holzfaserdämmung. 78
Tabelle 21: Wandaußen- und Zwischentemperaturen der Holzwand mit Holzfaserdämmung..... 79
Tabelle 22: ermittelte Wärmedurchgangskoeffizienten, gemessen mit der Wärmebildkamera bzw. dem Thermofühler für die Holzwand mit Holzfaserdämmung..... 80
Tabelle 23: gemittelte Innen-und Außentemperaturen zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Holzwand mit Holzfaserdämmung. 80
Tabelle 24: gemittelte Wandaußentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Holzwand mit Holzfaserdämmung. 81
Tabelle 25: Ermittlung des Vertrauensbereichs der Innen- und Außentemperaturen, sowie der Wandaußentemperaturen. 82
Tabelle 26: Messwerte zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten innen für die Holzwand mit EPS-Dämmung..... 84
Tabelle 27: Messwerte zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten außen für die Holzwand mit EPS-Dämmung..... 85
Tabelle 28: Wandaußen- und Zwischentemperaturen der Holzwand mit EPS-Dämmung. 86

Tabelle 29: ermittelte Wärmedurchgangskoeffizienten, gemessen mit der Wärmebildkamera bzw. dem Thermofühler für die Holzwand mit EPS-Dämmung. 87
Tabelle 30: gemittelte Innen-und Außentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Holzwand mit EPS-Dämmung. 87
Tabelle 31: gemittelte Wandaußentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Holzwand mit EPS-Dämmung. 88
Tabelle 32: Ermittlung des Vertrauensbereichs der Innen- und Außentemperaturen, sowie der Wandaußentemperaturen. 89
Tabelle 33: Messwerte zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten innen für die Betonwand mit StarTherm-Dämmung. 92
Tabelle 34: Messwerte zur Ermittlung des Wärmedruchgangskoeffizienten außen für die Betonwand mit der StarTherm-Dämmung. 92
Tabelle 35: Wandaußen- und Zwischentemperaturen der Betonwand mit StarTherm-Dämmung .. 94
Tabelle 36: ermittelte Wärmedurchgangskoeffizienten, gemessen mit der Wärmebildkamera bzw. dem Thermofühler für die Betonwand mit StarTherm-Dämmung. 94
Tabelle 37: gemittelte Innen-und Außentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Betonwand mit StarTherm-Dämmung. 95
Tabelle 38: gemittelte Wandaußentemperaturen, gemessen mit der Wärmebildkamera und dem Thermofühler zur Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Betonwand mit StarTherm-Dämmung. 95
Tabelle 39: Ermittlung des Vertrauensbereichs der Innen- und Außentemperaturen, sowie der Wandaußentemperaturen. 96

6.4 Literaturverzeichnis

Böckh, Peter; Wetzel, Thomas (2014): Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis. 5., überarb. und erw. Aufl. 2014. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bogusch, Norbert; Duzia, Thomas (2012): Basiswissen Bauphysik. Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl.

Campbell, James W. P.; Pryce, William; Seuß, Rita (2003): Backstein. Eine Architekturgeschichte - von den Anfängen bis zur Gegenwart. Dt. Erstausg. München: Knesebeck.

Fouad, Nabil A.; Richter, Torsten (2012): Leitfaden Thermografie im Bauwesen. Theorie, Anwendungsgebiete, prakitsche Umsetzung. 4., überrbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Freymuth, Hanns; Jenisch, Richard; Klopfer, Heinz; Petzold, Karl; Stohrer, Martin; Fischer, Heinz-Martin; Richter, Ekkehard (2002): Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima. 5., überarb. Auflage 2002. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Gabriel, Ingo; Endhardt, Martin (Hg.) (2010): Vom Altbau zum Niedrigenergie- und Passivhaus. Gebäudesanierung, neue Energiestandards, Planung und Baupraxis, mit EnEV 2009. 8., überarb. Aufl. Staufen bei Freiburg: Ökobuch.

Gießler, Martin (2012): Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, 11).

Häupl, Peter (2008): Bauphysik. Klima, Wärme, Feuchte, Schall ; Grundlagen, Anwendungen, Beispiele. Berlin: Ernst.

Häupl, Peter; Willems, Wolfgang M. (Hg.) (2013): Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima. 7., vollst. überarb. und aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch).

Heck, Friedrich (2007): Energiekosten senken. Kosten und Nutzen von Wärmedämmmaßnahmen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.

Hegner, Hans-Dieter (Hg.) (2008): Energieausweise für die Praxis. Handbuch für Energieberater, Planer und Immobilienwirtschaft. 1. Aufl. Köln, Stuttgart: Bundesanzeiger-Verl; Fraunhofer-IRB-Verl (Bau, Immobilien, Vergabe).

Justus-Liebig-Universität Gießen: Wildkaninchen mit der Infrarotkamera ins Nest geschaut. Online verfügbar unter http://www.uni-protokolle.de/nachrichten/id/57359/, zuletzt geprüft am 16.11.2014.

Königstein, Thomas (2009): Ratgeber energiesparendes Bauen. Auf den Punkt gebracht: neutrale Fachinformationen für mehr Energieeffizienz. 4., bearb. und erw. Aufl. Taunusstein: Blottner.

Lohmeyer, Gottfried C. O.; Post, Matthias; Bergmann, Heinz (2008): Praktische Bauphysik. Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen ; mit 300 Tabellen und 323 Beispielen. 6., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Studium Kompakt - verständlich - gut).

Lückmann, Rudolf (2009): Holzbau. Energieeffiziente Baudetails. 1. Aufl. Kissing: WEKA MEDIA.

Ludger Dederich (2009): Holzbau Handbuch Reihe 1: Entwurf und Konstruktion Teil 1: Holzbausysteme Holzbau Handbuch. Bonn: Holzabsatzfonds.

Marius Meier (2010): Entwicklung eines Laborversuchs zur Bestimmung von Wärmeleitfähigkeiten mit Hilfe einer Infrarotkamera. Bachelor Thesis. Hochschule Offenburg, Offenburg.

Martin Rombach: Vorrichtung zur Ermittlung des U-Werts. Angemeldet durch Testo AG. Anmeldenr: 06001225.9. Veröffentlichungsnr: EP1684065.

n-tv.de (2014): Vorsichtsmaßnahmen weltweit. Diese Flughäfen kontrollieren wegen Ebola. Übereifer oder Prävention? Im Kampf gegen Ebola treffen auch außerhalb Afrikas immer mehr Länder Vorsichtsmaßnahmen an Flughäfen. Wo erwarten Reisende welche Kontrollen - und was hat das bislang gebracht? Eine Übersicht., 24.10.2014. Online verfügbar unter http://www.n-tv.de/panorama/Diese-Flughaefen-kontrollieren-wegen-Ebola-article13841396.html.

Quaschning, Volker (2008): Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe, Techniken, Anlagenplanung, Wirtschaftlichkeit. München: Hanser.

Rhena Wulf (2009): Wärmeleitfähigkeit von hizebeständigen und feuerfesten Dämmstoffen- Untersuchungen zur Ursache für unterschiedliche Messergebnisse bei Verwendung verschiedener Messverfahren. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg. Online verfügbar unter http://d-nb.info/994116438/34, zuletzt geprüft am 05.12.2014.

Schild, Kai; Willems, Wolfgang M. (2011): Wärmeschutz. Grundlagen – Berechnung – Bewertung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden.

Schuster, Norbert; Kolobrodov, Valentin G. (2000): Infrarotthermographie. 1. Aufl. Berlin u.a.: Wiley-VCH.

Tuschinski, Melita (2013): Neue EnEV 2014 im Bestand. Was ändert sich und was ist neu im Vergleich zur geltenden Energieeinsparordnung EnEV 2009? In: *Bausubstanz : Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege* 4 (4), S. 24–30, zuletzt geprüft am 05.12.2014.

Universität Kassel (2014): Masterarbeit für zwei Student/inn/en. Online verfügbar unter http://www.ide-kassel.de/fileadmin/user_upload/downloads/Ausschreibungen/14_03_24_Ausschreibung_Masterarbeit_Thermografie_DF2-uj.pdf, zuletzt geprüft am 23.12.2014.

Wallrabe, Arnulf (2001): Nachtsichttechnik. Infrarot-Sensorik: physikalische Grundlagen, Aufbau, Konstruktion und Anwendung von Wärmebildgeräten. Wiesbaden, s.l.: Vieweg+Teubner Verlag.

Weber, Helmut (1982): Thermografie im Bauwesen. Grafenau / Württ.: Expert-Verl (Kontakt & Studium, 81).

Zelger, Thomas (2000): Ökologie der Dämmstoffe. Grundlagen der Wärmedämmung ; Lebenszyklusanalyse von Wärmedämmstoffen ; optimale Dämmstandards. Hg. v. Hildegund Mötzl. Wien u.a.: Springer.

Zimmermann, Thomas; Zimmermann, Martina (2012): Lehrbuch der Infrarotthermografie. Allgemeine Grundlagen der Thermodynamik, Grundlagen der Strahlungsphysik, Infrarot-Geräte-Technologie (für normative Stufe 1 und 2). Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.

Zürcher, Christoph; Frank, Thomas (2004): Bauphysik. 2., durchges. und aktualisierte Aufl. Zürich: Vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH (Bau und Energie, Bd. 2).

7. Erklärung

Ich erkläre, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken, gegebenenfalls auch elektronischen Medien, entnommen sind, sind von mir durch Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Entlehnungen aus dem Internet sind durch Angabe der Quelle und des Zugriffsdatums sowie dem Ausdruck der ersten Seite belegt; sie liegen zudem für den Zeitraum von zwei Jahren entweder auf einem elektronischen Speichermedium im PDF-Format oder in gedruckter Form vor.

(Soraya Beck) (Ort, Datum)