

**Freie wissenschaftliche Arbeit
zur Erlangung des Grades eines Diplom-Ingenieurs
an der Technischen Universität Berlin**

**Untersuchung der Konstruktionsweisen im
Strohballenbau hinsichtlich ihres
Wärmedämmverhaltens mit Hilfe der
Thermografie**

Ole Hemke

Matr.-Nr.: 208013

28. Oktober 2009

Fakultät III: Prozesswissenschaften
Institut für Energietechnik
Fachgebiet Maschinen- und
Energieanlagentechnik
Prof. Dr.-Ing. Felix Ziegler

Betreuung durch:
Dipl.-Ing. Uwe Krien
Dipl.-Ing. Arch. Friederike Fuchs

Die selbstständige und eigenfertige Anfertigung versichere ich an Eides statt

Berlin, 28. 10. 2009

Ole Hemke, Matr.-Nr.: 208013

Die vorliegende Arbeit untersucht die Konstruktionsweisen im Strohballenbau hinsichtlich ihres Wärmedämmverhaltens mit Hilfe der Thermografie. Dazu wurden Innen- und Außenthermografiemessungen von neun Strohballenhäusern unterschiedlicher Bauweisen in Nord- und Ostdeutschland gemacht. Die Schwerpunkte wurden hierbei auf die Wandkonstruktionen einerseits und auf ausgewählte Konstruktionsdetails andererseits gelegt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, ob beim Bau von Strohballenhäusern Wärmebrücken entstehen, die nicht allein auf den Dämmstoff Stroh zurückzuführen sind, sondern die von der Art der Ausführung beim Komprimieren, beim Stopfen, bei der Luftdichtung oder beim Feuchteschutz abhängig sind. Darüber hinaus wurde überprüft, ob es potentielle Wärmebrücken gibt, die unter Laborbedingungen nicht auftraten oder die bei den bisherigen theoretischen Überlegungen vernachlässigt wurden.

Mit Hilfe der Thermografie konnte gezeigt werden, dass alle untersuchten Wandkonstruktionen von Strohballenhäusern sehr gute Wärmedämmeigenschaften aufweisen. Die Konstruktionen mit innen stehenden Holzständern und die lasttragende Bauweise zeigen dabei etwas homogenere Temperaturverteilungen als die Bohlenständerbauweise und die TJI-Trägerkonstruktion.

Die Thermogramme zeigen ebenfalls, dass die bisherigen – relativ aufwendigen – Bemühungen bei der Luftdichtung sowie beim Komprimieren und Stopfen von Strohballenwänden aus wärmedämmtechnischer Sicht gerechtfertigt sind. Kritische Wärmebrücken, die nur in Ausnahmefällen auftraten, sind vermutlich auf Verarbeitungsfehler bei der Luftdichtung zurückzuführen. Von innen nach außen durchgehende Holzbalken stellen – bei korrekter Luftdichtung – in der Regel keine kritischen Wärmebrücken dar. Probleme mit Feuchtigkeit konnten bei keinem der untersuchten Strohballenhäuser festgestellt werden.

This thesis analyses methods of building with straw bales with regard to their thermal insulation characteristics, using the technique of thermography. Internal and external thermographic measurements were therefore taken for nine straw bale houses located in northern and eastern Germany, made using different building techniques. The main focus was on wall design as well as on specific details of construction.

Within the framework of this thesis, an analysis was conducted to ascertain whether thermal bridges are created during the construction of straw bale houses that do not derive as a result of using straw as an insulation material but rather that depend on the processing techniques used when compressing or stuffing the straw bale walls and sealing them against the ingress of air and moisture. In addition, further testing was undergone to examine whether there are potential thermal bridges that have not occurred under laboratory conditions or that have been neglected in prior theoretical examinations.

With the help of thermography, it was demonstrated that all the wall designs of the straw bale houses studied exhibited very good thermal insulation characteristics. Those constructions with posts on the insides of the straw bale walls and the load-bearing construction showed a slightly more homogeneous temperature distribution than the timber frame construction and the I beam construction.

In addition, the thermograms showed that for thermal insulation purposes the existing, relatively time-consuming efforts to compress, stuff and seal the walls against the ingress of air or moisture are justified. Critical thermal bridges, that only occurred in exceptional cases, are likely to derive from processing defects which occur when sealing against the ingress of air. Provided that the sealing process is carried out correctly, timber that passes from the inside to the outside of a wall does not tend to exhibit critical thermal bridges. Problems concerning moisture were not discovered in any of the straw bale houses studied.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Verzeichnis der Formelzeichen, Einheiten und Abkürzungen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stroh als Naturdämmstoff	3
1.2.1 Einteilung der Naturdämmstoffe	3
1.2.2 Eigenschaften	3
2 Bauphysikalische Grundlagen	7
2.1 Wärmeleitfähigkeit und Wärmedämmstoffe	7
2.1.1 Definition der Wärmeleitfähigkeit	7
2.1.2 Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	7
2.1.3 Einteilung der Wärmedämmstoffe	8
2.2 Wärmetransportvorgänge in Außenbauteilen	8
2.2.1 Überblick	8
2.2.2 Stationäre Wärmeleitung	9
2.2.3 Stationärer Wärmeübergang	10
2.2.4 Stationärer Wärmedurchgang	11
2.2.5 Inhomogene Schichten	11
2.3 Wärmebrücken	15
2.3.1 Definition	15
2.3.2 Geometrische Wärmebrücke	16
2.3.3 Materialbedingte Wärmebrücke	16
2.3.4 Mischform	17
3 Thermografie als Messmethode	19
3.1 Grundlagen der Thermografie	19

Inhaltsverzeichnis

3.1.1	Überblick	19
3.1.2	Physikalisches Prinzip	19
3.1.3	Emissionsgrad	20
3.1.4	Einfluss der Atmosphäre und der Umgebungsstrahlung	21
3.2	Durchführung thermografischer Messungen	22
3.2.1	Außen- und Innenmessungen	22
3.2.2	Verwendete Thermografiertechnik	23
3.2.3	Wärmebrücken im Thermogramm	23
3.3	Fehleranalyse	24
3.3.1	Meteorologische Randbedingungen	25
3.3.2	Emissionsgrad	26
3.3.3	Rechnerische Überprüfung der Messgenauigkeit	26
3.3.4	Zusammenfassung	28
4	Wärmedämmung von Strohballenhäusern	29
4.1	Konstruktionsarten des Strohballenbaus	29
4.1.1	Überblick	29
4.1.2	Lasttragende Bauweise	29
4.1.3	Holzständerbauweise	30
4.2	Balleneigenschaften	31
4.2.1	Rohstoff	31
4.2.2	Abmessungen	32
4.2.3	Einbaulage	32
4.2.4	Feuchtigkeit	32
4.3	Wärmedämmung und potentielle Wärmebrücken	33
4.3.1	Wärmedurchgangskoeffizient	33
4.3.2	Vergleich des Energiestandards bei Strohballenhäusern	34
4.3.3	Bewertung der Holzständerkonstruktion	36
4.3.4	Bewertung eines Konstruktionsdetails	37
5	Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen	39
5.1	Einleitung	39
5.2	Vorbemerkung zu den Thermogrammen	40
5.2.1	Temperaturskala	40
5.2.2	Witterungseinflüsse	40
5.3	Wandaufbauten im Thermogramm	41
5.3.1	Bohlenständerbauweise	41
5.3.2	TJI-Trägerkonstruktion	46

5.3.3	Bauweisen mit innen stehenden Holzständern	49
5.3.4	Lasttragende Bauweise	52
5.4	Konstruktionsdetails im Thermogramm	54
5.4.1	Balkendurchführungen	54
5.4.2	Erker	58
5.5	Auswertung	60
6	Zusammenfassung und Ausblick	63
	Literaturverzeichnis	65
A	Beschreibung der zu untersuchenden Häuser	67
A.1	Überblick über die Standorte	67
A.2	Einfamilienhaus in Mittelherwigsdorf	68
A.3	Einfamilienhaus in Wunstorf	69
A.4	Einfamilienhaus in Papendorf	70
A.5	Gartenlaube in Berlin-Mariendorf	71
A.6	Villa Strohbund in Sieben Linden	72
A.7	Wohnhaus Strohpolis in Sieben Linden	73
A.8	Haus auf der Brunnenwiese in Sieben Linden	74
A.9	Villa Communia in Sieben Linden	75
A.10	Wohnhaus Windrose in Sieben Linden	76

Abbildungsverzeichnis

1.1	Marktübersicht Naturdämmstoffe [11]	4
2.1	Temperaturverlauf im Querschnitt eines mehrschichtigen Bauteils am Beispiel einer dreischichtigen Betonsandwichwand (Plattenbau) [18]	9
2.2	Wärmeströme durch eine Außenwand aus Holzständern und Strohballen	12
2.3	Wärmefluss zwischen unterschiedlich temperierten Bereichen: zwischen Bohle und Strohballen (links) bzw. zwischen (mit Putz gefüllter) Fuge und Strohballen (rechts)	13
2.4	Links: geometrische Wärmebrücke; rechts: Mischform aus geometrischer und materialbedingter Wärmebrücke (jeweils mit Isothermen)	16
3.1	Plancksches Strahlungsgesetz	20
3.2	Einfluss der Atmosphäre und der Messumgebung aus [14]	21
3.3	Überblick über die technischen Daten der VARIOSCAN high resolution, Typ 3021 St, von InfraTec aus [15]	24
3.4	Links: mit Eiswasser gefüllte Regentonnen [Foto: privat]; rechts: Temperaturverteilung (Zeichnung nicht maßstäblich)	27
4.1	Links: Strohballenhaus in lasttragender Bauweise; rechts: Strohballenhaus mit TJI-Trägerkonstruktion und Strohballenausfachung [Fotos: privat; R. Schilk] . . .	30
4.2	Unterschiedliche Lage von Strohballen und Skelettstrukturen: a - innen stehender Holzständer, b - mittig stehender Holzständer, c - durchgehende Bohle, d - innen und außen stehende Bohle, e - TJI-Träger	31
4.3	Typische Abmessungen eines Kleinstrohballens	32
4.4	Einbaulage der Strohballen: a - aufrecht stehend; b - hochkant liegend; c - flach liegend	33
5.1	Außenthermografie der Ostansicht des Einfamilienhauses in Bohlenständerbauweise in Mittelherwigsdorf bei Zittau (mit Lüftungsrohr)	43
5.2	Außenthermografie der Nordansicht des Einfamilienhauses in Bohlenständerbauweise in Wunstorf	44

Abbildungsverzeichnis

5.3	Außenthermografie der Ostansicht des Wohnhauses Windrose in Bohlenständerbauweise	45
5.4	Außenthermografie der Westansicht des Einfamilienhauses mit TJI-Trägerkonstruktion in Papendorf	47
5.5	Innenthermografie einer Zimmerecke des Einfamilienhauses in Papendorf mit TJI-Trägerkonstruktion und Ringanker	48
5.6	Außenthermografie der Ostansicht des Wohnhauses Strohpolis mit innen stehenden Holzständern	50
5.7	Außenthermografie der Westansicht der Villa Strohbund mit innen stehenden Holzständern	51
5.8	Außenthermografie der Gartenlaube in lasttragender Bauweise in Berlin (Mariendorf)	53
5.9	Außenthermografie der Südansicht des Wohnhauses Strohpolis mit durchgehenden Balken	55
5.10	Außenthermografie der Südansicht der Villa Strohbund mit einem von innen nach außen durchgehenden Holzbalken	56
5.11	Innenthermografie des Wohnbereichs im Haus auf der Brunnenwiese mit ungenügend gedämmter Balkendurchführung	57
5.12	Außenthermografie des Erkers der Villa Communia mit in halber Dicke eingebauten Strohbällen	59
A.1	Standorte der untersuchten Strohbällenhäuser: A - Wunstorf bei Hannover; B - Ökendorf Sieben Linden; C - Papendorf/Ostvorpommern; D - Berlin-Mariendorf; E - Mittelherwigsdorf bei Zittau	67
A.2	Einfamilienhaus in Bohlenständerbauweise in Mittelherwigsdorf bei Zittau . . .	68
A.3	Einfamilienhaus in Bohlenständerbauweise in Wunstorf (Idensen)	69
A.4	Einfamilienhaus mit TJI-Trägerkonstruktion in Papendorf (Ostvorpommern) . . .	70
A.5	Gartenlaube in lasttragender Bauweise in Berlin-Mariendorf	71
A.6	Wohnhaus Villa Strohbund in Holzständerbauweise	72
A.7	Wohnhaus Strohpolis in Holzständerbauweise (Sieben Linden)	73
A.8	Wohnhaus auf der Brunnenwiese in Holzständerbauweise (Sieben Linden)	74
A.9	Wohnhaus Villa Communia in Holzrahmenbauweise (Sieben Linden)	75
A.10	Wohnhaus Windrose in Holzrahmenbauweise (Sieben Linden)	76

Tabellenverzeichnis

1.1	Wesentliche Rohstoffe für Naturdämmstoffe im Überblick aus [2]	5
2.1	Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_{Gefach}	14
2.2	Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_{Rahmen}	15
3.1	Emissionsgrad ε einiger ausgewählter Baustoffe bei der Temperatur ϑ aus [6] . .	20
3.2	Unterschiede zwischen Außen- und Innenmessungen aus [14]	23
4.1	Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U für eine typische Holzständerkonstruktion (aus [19], Wert für $\lambda_{Strohballen}$ aktualisiert)	35
4.2	Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U für eine typische lasttragende Strohballenwand (aus [19], Wert für $\lambda_{Strohballen}$ aktualisiert)	35
4.3	Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U für den Erker der Villa Communia, Ökodorf Sieben Linden	38

Formelzeichen, Einheiten und Abkürzungen

$\Delta\theta$	Temperaturdifferenz [K]
Λ	Wärmedurchlasskoeffizient [W/m^2K]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
λ_{Gefach}	Wärmeleitfähigkeit der Strohballen [W/mK]
λ_j	Wärmeleitfähigkeit der Bauteilschicht j [$W/(mK)$]
λ_{PE-HD}	Wärmeleitfähigkeit von Polyethylen (PE-HD) [W/mK]
λ_{Rahmen}	Wärmeleitfähigkeit der Holzkonstruktion [W/mK]
λ_R	rechnerischer Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
λ_{Tonne}	Wärmeleitfähigkeit der Regenwassertonne [W/mK]
Φ	Wärmestrom [W]
θ_e	Außenlufttemperatur [$^{\circ}C$]
θ_i	Innenlufttemperatur [$^{\circ}C$]
θ_i	Wassertemperatur [$^{\circ}C$]
θ_j	Temperatur an der Außenseite der Bauteilschicht j [$^{\circ}C$]
θ_{se}	Oberflächentemperatur an der Wandaußenseite [$^{\circ}C$]
θ_{si}	Oberflächentemperatur an der Wandinnenseite [$^{\circ}C$]
ε	Emissionsgrad [-]
A	Bauteilfläche [m^2]

Abkürzungsverzeichnis

CO_2	Kohlendioxid
d	Schichtdicke [m]
d_j	Schichtdicke der Bauteilschicht j [m]
e	maximaler Fehler [-]
f_{Gefach}	Flächenanteil der Strohballe [-]
f_{Rahmen}	Flächenanteil der Holzkonstruktion [-]
$h_{c,e}$	äußerer Wärmeübergangskoeffizient der Konvektion [W/m^2K]
$h_{c,i}$	innerer Wärmeübergangskoeffizient der Konvektion [W/m^2K]
h_e	äußerer Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2K]
h_i	innerer Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2K]
$h_{r,e}$	äußerer Wärmeübergangskoeffizient der Strahlung [W/m^2K]
$h_{r,i}$	innerer Wärmeübergangskoeffizient der Strahlung [W/m^2K]
q	Wärmestromdichte [W/m^2]
R	Wärmedurchlasswiderstand [m^2K/W]
R''_T	unterer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstands [m^2K/W]
R'_T	oberer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstands [m^2K/W]
R_{Gefach}	Wärmedurchgangswiderstand im Bereich der Strohballe [m^2K/W]
$R_{Kalkputz}$	Wärmedurchlasswiderstand von Kalkputz [m^2K/W]
$R_{Lehmputz}$	Wärmedurchlasswiderstand von Lehmputz [m^2K/W]
R_{Rahmen}	Wärmedurchgangswiderstand im Bereich der Holzkonstruktion [m^2K/W]
R_{se}	Wärmeübergangswiderstand an der Außenoberfläche [m^2K/W]
R_{si}	Wärmeübergangswiderstand an der Innenoberfläche [m^2K/W]
R_T	mittlerer Wärmedurchgangswiderstand [m^2K/W]
U	mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient [W/m^2K]

Abkürzungsverzeichnis

U'	erster Grenzwert des Wärmedurchgangskoeffizienten [W/m^2K]
U''	zweiter Grenzwert des Wärmedurchgangskoeffizienten [W/m^2K]
U_{Gefach}	Wärmedurchgangskoeffizient im Bereich der Strohballen [W/m^2K]
U_{Rahmen}	Wärmedurchgangskoeffizient im Bereich der Holzkonstruktion [W/m^2K]
$^{\circ}C$	Grad Celsius (Celsius-Temperatur)
K	Kelvin (Kelvin-Temperatur)
St	Stirling-Kühlung
TJI	Doppelstegträger der Firma TrusJoist (Markenname)
WLG	Wärmeleitfähigkeitsgruppe

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Bauen und Bewohnen von Häusern ist sehr ressourcenintensiv und beeinflusst in bedeutendem Maße den Treibhauseffekt und einen möglichen Klimawandel. Der Einsatz von Bau- und Dämmstoffen, die mit geringem energetischen Aufwand hergestellt werden, ist für den Klimaschutz unumgänglich. Ebenso tragen gut wärmegeämmte Gebäude zur Einsparung von Heizenergie und somit von CO_2 -Emissionen bei.

Da das Interesse für einen klima- und ressourcenschonenden Baustil wächst, gerät Stroh als ökologischer Baustoff wieder ins Blickfeld. Stroh ist ein nachhaltiger und regional verfügbarer Rohstoff, der im Gegensatz zu herkömmlichen Bau- und Dämmstoffen sehr energiearm in der Herstellung und auch bei der Entsorgung am Ende der Lebensdauer sehr unproblematisch zu handhaben ist. Obwohl die einstigen PionierInnen des Strohballenbaus in den USA vor einhundert Jahren eher aus Mangel an anderen Materialien zum Stroh als Baustoff griffen, zeigen die heutigen Strohballenbauten, dass sich mit Strohballen Häuser für vielfältige Bedürfnisse und in höchster Qualität bauen lassen.

Laborexperimente an einzelnen Strohballen und an unverputzten Strohballenwänden haben gezeigt, dass Stroh wie andere Naturdämmstoffe sehr gute Wärmedämmeigenschaften besitzt [17]. Theoretische Betrachtungen (und erste praktische Erfahrungen) kommen zu dem Ergebnis, dass sich mit Strohballen Häuser bauen lassen, die dem Niedrigenergiestandard¹ entsprechen. Dennoch existieren nach wie vor große Vorbehalte gegenüber dem Bauen mit Stroh.

Im Rahmen dieser Arbeit soll überprüft werden, ob beim Bau von Strohballenhäusern Wärmebrücken entstehen, die nicht allein auf den Dämmstoff Stroh zurückzuführen sind, sondern

¹ Der Begriff Niedrigenergiestandard ist weder durch eine Norm festgelegt noch rechtlich geschützt, weswegen es unterschiedliche Definitionen gibt. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Niedrigenergiestandard für Wohngebäude mit einem spezifischen Heizenergieverbrauch von größer als $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ und kleiner als $70 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ verwendet [20].

Einleitung

die von der Art der Ausführung beim Komprimieren, beim Stopfen, bei der Luftdichtung oder beim Feuchteschutz abhängig sind. Darüber hinaus soll geklärt werden, ob es potentielle Wärmebrücken gibt, die unter Laborbedingungen nicht auftraten oder die bei den theoretischen Überlegungen vernachlässigt wurden.

Zunächst wird in Kapitel 1 ein Überblick über Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen gegeben sowie die Vor- und Nachteile von Stroh als Dämmmaterial diskutiert. In Kapitel 2 werden die notwendigen Grundlagen der Bauphysik erläutert. Insbesondere wird auf die Definition der Wärmeleitfähigkeit, auf typische Wärmetransportvorgänge in Außenbauteilen und auf den Begriff der Wärmebrücke eingegangen.

Als Messmethode für die Untersuchung wird die Thermografie verwendet, die in Kapitel 3 erläutert wird. Im Rahmen dieser Arbeit sind Außen- und Innenthermografien von neun Strohballenhäusern im Norden und Osten der Bundesrepublik angefertigt worden. Die Schwerpunkte wurden hierbei auf die Wandkonstruktionen einerseits und auf ausgewählte Konstruktionsdetails andererseits gelegt. Die untersuchten Bauweisen sind die Bohlenständerkonstruktion, die TJI-Trägerkonstruktion², die Konstruktion mit innen stehenden Holzständern sowie die lasttragende Bauweise. Das Kapitel 4 liefert einen Überblick über diese Konstruktionsweisen sowie einige theoretische Überlegungen zur Wärmedämmung von Strohballenhäusern.

Die aussagekräftigsten Thermogramme sind in Kapitel 5 zusammengestellt. Die lokalisierten Wärmebrücken werden in Bezug auf ihre Ursachen und Ausmaße diskutiert und bewertet. In Kapitel 6 ist eine abschließende Bewertung der untersuchten Konstruktionsweisen und deren Bedeutung für die Weiterentwicklung des Strohballenbaus zu finden.

² TJI-Träger ist ein Markenname der Firma TrusJoist, wird aber auch synonym für ähnliche Produkte anderer Hersteller verwendet. Eine weitere Bezeichnung ist Doppelstegträger.

1.2 Stroh als Naturdämmstoff

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen und stellt die Vor- und Nachteile von Stroh als Dämmmaterial dar.

1.2.1 Einteilung der Naturdämmstoffe

Naturdämmstoffe sind Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, aus tierischen oder pflanzlichen Fasern oder aus Recyclingmaterial [2]. Sie werden hinsichtlich ihres Herstellungsprozesses unterschieden in:

1. Dämmstoffe aus der Landwirtschaft:

- Rohr und Gräser: Stroh, Schilfrohr, Seegras, Gras-Zellulose
- Naturfasern: Hanf, Flachs, Kokos
- Kork
- Baumwolle
- Schafwolle

2. Dämmstoffe aus Verarbeitungsrückständen:

- Holzprodukte: Holzweichfaserplatten, Holzspänedämmung
- Zelluloseprodukte: Zelluloseflocken, Zellulosematten

Obwohl Naturdämmstoffe in den letzten Jahren zunehmend an Verbreitung gefunden haben, dominieren die konventionellen Dämmstoffe wie Hartschäume oder Mineralwolle weiterhin den Dämmstoffmarkt mit einem Anteil von 95 Prozent. Naturdämmstoffe nehmen nur einen Anteil von 5 Prozent ein [2]. Die Anteile der einzelnen Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen stellt Abb. 1.1 dar.

1.2.2 Eigenschaften

Naturdämmstoffe sind konventionellen Materialien technisch ebenbürtig. Sie besitzen ähnlich gute Wärmedämmeigenschaften mit Wärmeleitfähigkeiten zwischen $0,04$ und $0,08 \text{ W/mK}$ [2]. Alle Stoffe erfüllen die Voraussetzungen für den Brandschutz und wurden der Kategorie B2 (normal entflammbar) zugeordnet³ [7]. Ökologisch betrachtet sind die Naturdämmstoffe den konventionellen Produkten weit überlegen: Sie werden aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen

³ Ausnahme: Holzwolle-Leichtbauplatten: B1 (schwer entflammbar)

Einleitung

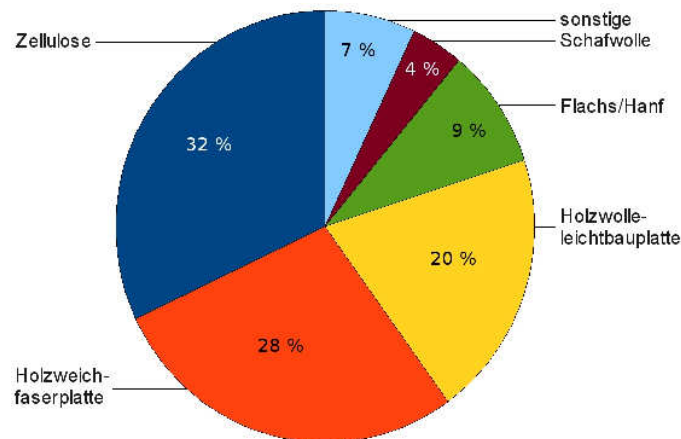


Abbildung 1.1: Marktübersicht Naturdämmstoffe [11]

und sind somit CO_2 -neutral. Sie besitzen einfache Rückbaumöglichkeiten und können am Ende ihrer Lebensdauer unproblematisch entsorgt werden. Darüber hinaus sind sie bis auf wenige Ausnahmen⁴ sehr energiearm in der Herstellung. Beispielsweise werden für die Herstellung von Strohballen $14 MJ/m^3$ Energie benötigt, für Mineralwolle hingegen $1077 MJ/m^3$ [19].

Die Einsatzgebiete von Naturdämmstoffen sind vielfältig: Fast alle Anwendungen in Decken-, Dach- und Wandbereichen sind möglich. Die einzige Einschränkung besteht darin, dass Naturdämmstoffe nicht als Perimeterdämmung (Flachdach, erdberührte oder spritzwassergefährdete Bauteile) verwendet werden können. Darüber hinaus können Holzspäne, lose Holzfasern, Schilfrohr, Strohballen und Zellulose nicht als Kerndämmung von zweischaligem Mauerwerk eingesetzt werden [7].

In Tabelle 1.1 ist zusammengefasst, welche Vor- und Nachteile der Dämmstoff Stroh gegenüber allen anderen Naturdämmstoffen besitzt. Die wärmedämmenden Eigenschaften von Stroh sind mit Wärmeleitfähigkeiten von $0,08 W/mK$ in Halmrichtung bzw. $0,052 W/mK$ quer zur Halmrichtung annähernd so gut wie bei den anderen Naturdämmstoffen. Im Gegensatz zu Graszellulose, Hanf, Flachs und Baumwolle muss Stroh nicht extra angebaut werden, sondern steht als landwirtschaftliches Abfallprodukt in großen Mengen zur Verfügung. Stroh ist in unseren Breiten regional verfügbar, somit entfallen weite Transportwege im Vergleich zu Kork und Baumwolle. Im Gegensatz zu Holzprodukten, Zellulose, Baum- und Schafwolle konkurriert die Nutzung von Stroh als Baustoff nicht wesentlich mit anderen Nutzungsarten.

⁴ Der Anbau von Baumwolle ist mit einem sehr hohen Wasser- und Energieverbrauch verbunden.

Tabelle 1.1: Wesentliche Rohstoffe für Naturdämmstoffe im Überblick aus [2]

Landwirtschaftliche Produkte				
Dämmstoff	λ [W/mK]	Herstellung	Herkunft	Konkurrenz mit anderer Nutzung
Stroh	0,052-0,080 ^a	Abfallprodukt des Getreideanbaus	regional	keine
Schilfrohr	0,045-0,055	Abfallprodukt der Seeuferpflege	regional	keine
Seegras	0,045	Abfallprodukt der Strandreinigung	regional	keine
Graszellulose	0,040	Anbau	regional	keine
Hanf	0,040-0,070	Anbau	regional	gering
Flachs	0,040	Nebenprodukt der Leinengewinnung	regional	gering
Kork	0,040-0,045	Nutzung der Korkeiche	importiert ^b	gering
Baumwolle	0,040	Anbau ^c	importiert	Kleidung, Flächenkonkurrenz ^d
Schafwolle	0,040	Viehzucht	regional und importiert	Kleidung
Produkte aus Verarbeitungsrückständen				
Dämmstoff	λ [W/mK]	Herstellung	Herkunft	Konkurrenz mit anderer Nutzung
Holzfasern, -späne	0,040-0,055	Abfallprodukt der Holzindustrie	regional und importiert	Holzprodukte, Energiegewinnung
Zellulose	0,040-0,045	Abfallprodukt (Altpapier)	regional	Altpapierprodukte

^a Der rechnerische Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ_R beträgt in Halmrichtung $0,08 W/mK$ und quer zur Halmrichtung $0,052 W/mK$, vgl. Kap. 4.2.3 auf Seite 32.

^b Korkeichen wachsen auf der iberischen Halbinsel und in Nordafrika.

^c Baumwolle wird in der Regel in Monokulturen unter hohem Pestizideinsatz und mit hohem Wasser- und Energieverbrauch angebaut.

^d Der Baumwollanbau konkurriert in den Ländern des Südens mit den Flächen für den Anbau von Nahrungsmitteln.

2 Bauphysikalische Grundlagen

2.1 Wärmeleitfähigkeit und Wärmedämmstoffe

2.1.1 Definition der Wärmeleitfähigkeit

Für die wärmeschutztechnische Einstufung von Baustoffen wird die Wärmeleitfähigkeit λ zugrunde gelegt. Die Wärmeleitfähigkeit λ ist definiert als der Wärmestrom Φ , der durch 1 m^2 einer 1 m dicken Schicht eines Stoffes fließt, wenn der Temperaturunterschied zwischen den beiden Oberflächen dieser Schicht 1 K beträgt [27]:

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot d}{A \cdot \Delta\theta} \quad (2.1)$$

mit Φ := gemessener Wärmestrom [W]
 d := Schichtdicke des zu prüfenden Baustoffs [m]
 A := Prüffläche [m^2]
 $\Delta\theta$:= konstante Temperaturdifferenz [K]

2.1.2 Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit

Wird die Wärmeleitfähigkeit λ eines Baustoffs experimentell bestimmt, so geschieht das im trockenen Zustand. In der Wand können allerdings für kurze Zeiten feuchtere Bedingungen herrschen, die eine Verschlechterung der Dämmwirkung zur Folge haben könnten. Außerdem wird angenommen, dass bei Naturdämmstoffen wegen unregelmäßiger Produktion keine einheitliche Dämmwirkung gewährleistet ist. Aus diesen Gründen wird bei Naturdämmstoffen die Wärmeleitfähigkeit mit einem Sicherheitszuschlag von 20 Prozent versehen. Diese Größe ist der rechnerische Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ_R [19].

2.1.3 Einteilung der Wärmedämmstoffe

Entsprechend ihrer Wärmeleitfähigkeit werden die Wärmedämmstoffe in Wärmeleitfähigkeitsgruppen (WLG) eingeteilt. Die Wärmeleitfähigkeitsgruppe leitet sich aus dem rechnerischen Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ_R ab und entspricht den ersten drei Ziffern nach dem Komma. Ein Wert von $\lambda_R = 0,035 \text{ W/mK}$ entspricht also einer WLG von 035. Je kleiner der WLG-Wert ist, um so größer ist die Wärmedämmung.

Es gibt eine Vielzahl von Wärmedämmstoffen, die sich in ihrer Wärmeleitfähigkeit, aber auch in einigen anderen Eigenschaften unterscheiden. Zu den gebräuchlichsten Dämmstoffen gehören die Mineralfasern und die Polystyrol-Hartschäume. Diese konventionellen Dämmstoffe schneiden mit Wärmeleitfähigkeiten von $0,035 \text{ W/mK}$ bis $0,040 \text{ W/mK}$ etwas besser ab als Naturdämmstoffe, ihr Primärenergieinhalt ist jedoch deutlich höher. Tabellarische Übersichten über weitere Eigenschaften der wichtigsten Dämmstoffe, wie Rohdichten, Baustoffklassen und Anwendungsbereiche sind bei Barth [2] und Heck [13] zu finden.

2.2 Wärmetransportvorgänge in Außenbauteilen

2.2.1 Überblick

Unterschiedliche Temperaturen auf beiden Seiten eines Bauteils führen zu einem Wärmestrom in Richtung des Temperaturgefälles [1]. Beispielhaft ist in Abb. 2.1 ein typischer Temperaturverlauf durch ein Außenbauteil dargestellt. Dabei treten die folgenden Wärmetransportvorgänge auf:

- Die Wärmeübertragung von der Raumluft an die Innenoberfläche des Bauteils erfolgt durch Konvektion und Strahlung. Dabei überwindet die Wärmeenergie den Wärmeübergangswiderstand $R_{si} = 1/h_i$ und tritt in das Bauteil ein.
- Im Innern des ein- oder mehrschichtigen Bauteils erfolgt die Wärmeübertragung durch Leitung, sofern keine Luftschichten vorhanden sind¹. Die Wärmeenergie überwindet dabei den Wärmedurchlasswiderstand $R = 1/\Lambda$ und gelangt schließlich an die Außenoberfläche des Bauteils. Sind Luftschichten vorhanden, so erfolgt der Wärmefluss auch durch Konvektion und Strahlung und wird dadurch weiter verzögert².

¹ Bauteile, die keine Luft enthalten, sind zum Beispiel Holz, Stein und Stahl.

² Aus diesem Grund enthalten die meisten Dämmstoffe Luft. Allerdings wird die höchste Dämmwirkung erzielt, wenn die Luft in möglichst kleinen Kammern eingeschlossen ist, damit die Konvektionsströme nicht zu groß werden.

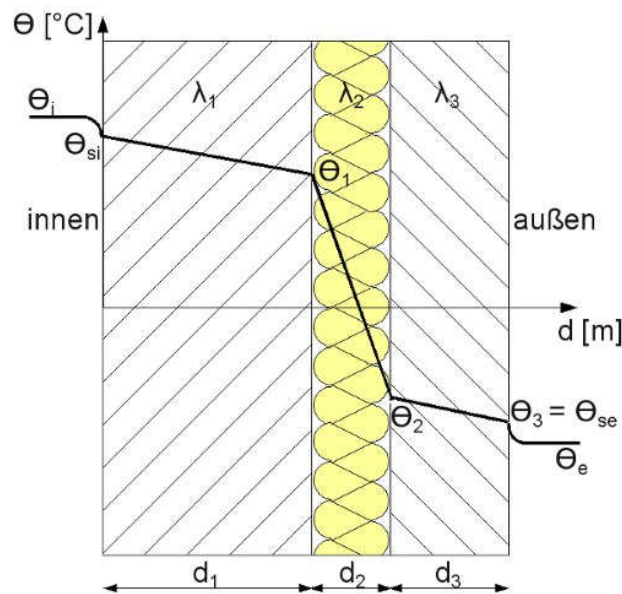


Abbildung 2.1: Temperaturverlauf im Querschnitt eines mehrschichtigen Bauteils am Beispiel einer dreischichtigen Betonsandwichwand (Plattenbau) [18]

- Von der Außenoberfläche an die Außenluft erfolgt der Wärmeübergang wieder durch Konvektion und Strahlung. Die Wärmeenergie überwindet dabei den Wärmeübergangswiderstand $R_{se} = 1/h_e$.

2.2.2 Stationäre Wärmeleitung

Innerhalb des Bauteils erfolgt der Wärmetransport durch Wärmeleitung und wird durch das Fouriersche Gesetz der Wärmeleitung beschrieben. Vereinfachend wird häufig angenommen, dass es sich bei diesem Transportvorgang um eine eindimensionale stationäre Wärmeleitung in einem ebenen Bauteil ohne Quellen oder Senken handelt. Für die Wärmestromdichte q vereinfacht sich das Fouriersche Gesetz zu

$$q = \frac{\Phi}{A} = \Lambda \cdot (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (2.2)$$

- mit
- Φ := Wärmestrom [W, kW]
 - A := Bauteilfläche [m^2]
 - Λ := Wärmedurchlasskoeffizient [W/m^2K]
 - θ_{si} := Oberflächentemperatur an der Wandinnenseite [$^{\circ}C$]
 - θ_{se} := Oberflächentemperatur an der Wandaußenseite [$^{\circ}C$]

Bauphysikalische Grundlagen

bzw. $\Lambda := 1/R$

mit $R :=$ Wärmedurchlasswiderstand [m^2K/W]

Je größer der Wärmedurchlasswiderstand $R = 1/\Lambda$ eines Bauteils ist, desto besser ist seine Wärmedämmung. Für homogene Bauteilschichten $j = 1, 2, \dots, n$ nichttransparenter, beidseitig luftberührter Bauteile errechnet sich der Bemessungswert des Wärmedurchlasswiderstandes R_j nach [5] wie folgt:

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_j} \quad (2.3)$$

mit $d_j :=$ Schichtdicke der Bauteilschicht j [m]

$\lambda_j :=$ Wärmeleitfähigkeit der Bauteilschicht j [$W/(mK)$], vgl. Kap. 2.1.2

Für das in Abb. 2.1 dargestellte Bauteil ergibt sich demnach ein Wärmedurchlasswiderstand von

$$R = \sum_{j=1}^3 R_j = \sum_{j=1}^3 \frac{d_j}{\lambda_j} \quad (2.4)$$

2.2.3 Stationärer Wärmeübergang

An den Bauteiloberflächen bildet sich innen und außen je eine Grenzschicht der Lufttemperatur θ und es findet ein Wärmeübergang durch Konvektion und Strahlung statt. Die Wärmeübergangskoeffizienten der Konvektion $h_{c,i/e}$ und der Strahlung $h_{r,i/e}$ werden üblicherweise zusammengefasst. Für die Wärmestromdichte q ergibt sich somit an der Bauteilinnenseite:

$$q = h_i \cdot (\theta_i - \theta_{si}) \quad (2.5)$$

Und äquivalent an der Bauteilaußenseite:

$$q = h_e \cdot (\theta_{se} - \theta_e) \quad (2.6)$$

mit $h_{i/e} := h_{c,i/e} + h_{r,i/e}$
:= Wärmeübergangskoeffizient [W/m^2K]

bzw. $h_{i/e} := 1/R_{s,i/e}$

mit $R_{s,i/e} :=$ Wärmeübergangswiderstand [m^2K/W]

Bei Außenbauteilen mit einem Wärmestrom in horizontaler Richtung beträgt der typische Wert für den außenseitigen Wärmeübergangswiderstand R_{se} $0,04 m^2K/W$ und für den innenseitigen Wärmeübergangswiderstand R_{si} $0,13 m^2K/W$ [5].

2.2.4 Stationärer Wärmedurchgang

Unter der Annahme eines stationären Wärmestroms durch ein Bauteil ohne Wärmequelle sind die Wärmestromdichten in den Gleichungen (2.2), (2.5) und (2.6) gleich groß. Das aus diesen Gleichungen entstehende Gleichungssystem lässt sich zu einer einzigen Gleichung zusammenfassen, die den Wärmedurchgang durch das Bauteil beschreibt. Für die Wärmestromdichte gilt also:

$$q = \left(\frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{h_e}} \right) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (2.7)$$

bzw.:

$$q = \left(\frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \right) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (2.8)$$

Die eingeklammerte Konstante ist der Wärmedurchgangskoeffizient U [W/m^2K] oder kurz U-Wert. Somit vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$q = U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (2.9)$$

Da die Temperaturen innen durch die gewünschte Behaglichkeit der NutzerInnen und außen durch das Klima vorgegeben sind, kann die Wärmestromdichte q durch ein Bauteil – und in der Summe aller Bauteile damit der Transmissionswärmestrom durch das Gesamtgebäude – nur durch Veränderung des U-Wertes beeinflusst werden.

2.2.5 Inhomogene Schichten

Problemstellung

Besteht ein Bauteil aus nebeneinander liegenden Schichten mit unterschiedlichen Wärmedurchgangskoeffizienten U , so wird nach DIN EN ISO 6946 ein mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient bestimmt. Dieses Berechnungsverfahren bietet sich insbesondere dann an, wenn das Bauteil aus Rahmen und Gefachen besteht – im Falle der Bohlenständerkonstruktion³ also aus Holzrahmen und Strohballen [24].

³ Zum Begriff der Bohlenständerkonstruktion vgl. Kap. 4.1.3 auf Seite 30.

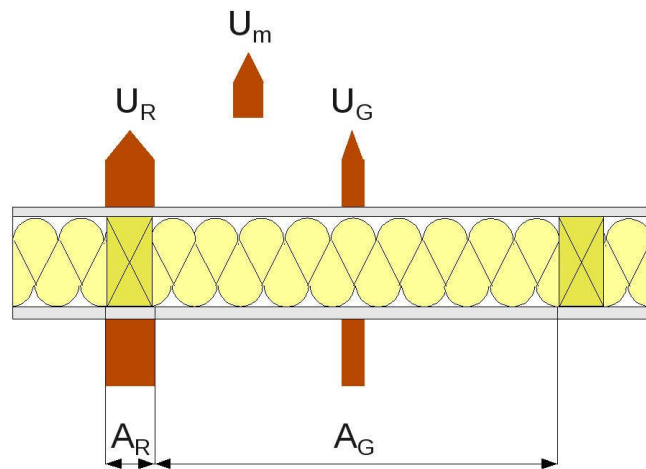


Abbildung 2.2: Wärmeströme durch eine Außenwand aus Holzständern und Strohballen

Der Wandaufbau der Bohlenständerkonstruktion bewirkt eine thermische Inhomogenität, das heißt, dass durch die Bohlenständer ein größerer Wärmestrom als durch die Strohballen fließt und dass sich innerhalb der Strohballenwand bei gleichem Abstand von der Oberfläche unterschiedliche Temperaturen einstellen, vgl. Abb. 2.2. Dies bewirkt, dass zusätzlich zu dem Wärmestrom, der von innen nach außen fließt, auch ein Wärmeaustausch zwischen Bohlenständern und Strohballen stattfindet, vgl. Abb. 2.3 (links). Im Grenzbereich zwischen Bohlenständer und Strohballen entstehen somit andere Temperaturen als in der Mitte des jeweiligen Bauteils. In abgeschwächter Form tritt dieses Problem auch im Bereich der Ballenstoßkanten auf. Da die Strohballen nicht exakt quaderförmig sondern an den Ecken abgerundet sind, dringt – auch nach sehr sorgfältig ausgeführtem Stopfen der Fugen – stets etwas Putz in die Fugen ein, was zu einem erhöhten Wärmefluss im Bereich der Ballenstoßkanten führt, vgl. Abb. 2.3 (rechts).

Nachfolgend soll am Beispiel eines Strohballenhauses in Bohlenständerbauweise, dessen Thermogramm in Abb. 5.1 auf Seite 43 dargestellt ist, das Verfahren zur Berechnung des mittleren Wärmedurchgangswiderstands R_T erläutert werden. Es handelt sich um ein Einfamilienhaus in Mittelherwigsdorf bei Zittau, für dessen Wandaufbau Strohballen mit einer Dicke d von 30 cm verwendet worden sind.

Berechnung

Bei der Berechnung des Wärmedurchgangswiderstands R_T von inhomogenen Schichten wird der Mittelwert aus einem oberen und einem unteren Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstands bestimmt.

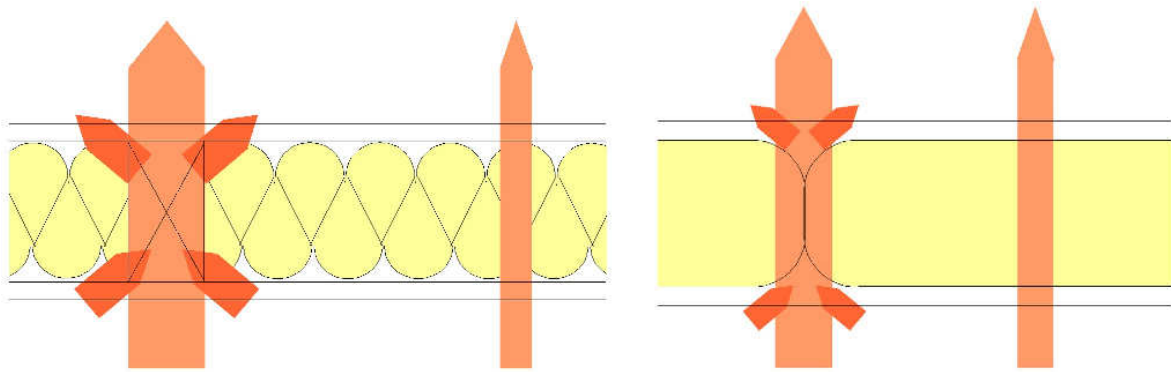


Abbildung 2.3: Wärmefluss zwischen unterschiedlich temperierten Bereichen: zwischen Bohle und Strohballen (links) bzw. zwischen (mit Putz gefüllter) Fuge und Strohballen (rechts)

Dafür werden zunächst die Flächenanteile f_{Gefach} und f_{Rahmen} bestimmt:

$$f_{Gefach} = \frac{A_{Gefach}}{A} = \frac{31,5 \text{ m}^2}{36,5 \text{ m}^2} = 86,3 \% \quad (2.10)$$

$$f_{Rahmen} = \frac{A_{Rahmen}}{A} = \frac{5,0 \text{ m}^2}{36,5 \text{ m}^2} = 13,7 \% \quad (2.11)$$

mit A := Gesamtfläche der Ostfassade abzüglich Fensterflächen

$Gefach$:= Strohballen-Anteil

$Rahmen$:= Holz-Anteil

Der erste Grenzwert des Wärmedurchgangskoeffizienten U' berechnet sich aus der Summe der Wärmeströme durch die unterschiedlichen Felder (vgl. Tabellen 2.1 und 2.2), bezogen auf deren jeweiligen Flächenanteil:

$$U' = U_{Gefach} \cdot \frac{A_{Gefach}}{A} + U_{Rahmen} \cdot \frac{A_{Rahmen}}{A} \quad (2.12)$$

$$U' = 0,166 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 0,863 + 0,392 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 0,137 \quad (2.13)$$

$$U' = 0,197 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (2.14)$$

Der obere Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstands R'_T lautet:

$$R'_T = \frac{1}{U'} = 5,068 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \quad (2.15)$$

Tabelle 2.1: Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_{Gefach}

	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Wärmedurchlasswiderstand $R = d/\lambda$ [m^2K/W]
R_{si}			0,130
Lehmputz	0,03	0,800	0,038
Strohballen	0,30	0,052	5,769
Kalkputz	0,03	0,870	0,034
R_{se}			0,040
R_{Gefach}	0,36		6,011
$U_{Gefach} = 1/R_{Gefach}$			0,166 W/m ² K

Der obere Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstands R'_T ist etwas größer als der tatsächliche Wert, da vernachlässigt wird, dass zwischen den unterschiedlich temperierten Bereichen Gefach und Rahmen auch ein Wärmeaustausch stattfindet. Für die Berechnung des unteren Grenzwerts des Wärmedurchgangswiderstands R''_T werden die Wärmeleitfähigkeiten mit den jeweiligen Flächenanteilen multipliziert:

$$R''_T = R_{si} + R_{Lehmputz} + \frac{d_{Gefach/Rahmen}}{\lambda_{Gefach} \cdot f_{Gefach} + \lambda_{Rahmen} \cdot f_{Rahmen}} + R_{Kalkputz} + R_{se} \quad (2.16)$$

$$R''_T = 5,028 \frac{m^2K}{W} \quad (2.17)$$

Der dazu gehörige Wärmedurchgangskoeffizient U'' lautet:

$$U'' = \frac{1}{R''_T} = 0,199 \frac{W}{m^2K} \quad (2.18)$$

Aus R'_T und R''_T ergibt sich der Mittelwert R_T :

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2} = 5,048 \frac{m^2K}{W} \quad (2.19)$$

Mit dem dazu gehörigen Wärmedurchgangskoeffizienten U :

$$U = \frac{1}{R_T} = 0,198 \frac{W}{m^2K} \quad (2.20)$$

Tabelle 2.2: Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U_{Rahmen}

	Dicke $d [m]$	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda [W/mK]$	Wärmedurchlass- widerstand $R = d/\lambda [m^2K/W]$
R_{si}			0,130
Lehmputz	0,03	0,800	0,038
Bohlenständer	0,30	0,130	2,308
Kalkputz	0,03	0,870	0,034
R_{se}			0,040
R_{Rahmen}	0,36		2,550
$U_{Rahmen} = 1/R_{Rahmen}$			0,392 W/m ² K

Der U-Wert dieses Strohballenhauses in Bohlenständerbauweise beträgt knapp 0,20 W/m²K. Die genaue Bewertung dieser Bauform ist in Kap. 4.3.3 auf Seite 36 zu finden.

2.3 Wärmebrücken

2.3.1 Definition

Als Wärmebrücke wird eine örtlich begrenzte Stelle in der Gebäudehülle mit höherer Wärmestromdichte q als in den unmittelbar angrenzenden Bauteilbereichen bezeichnet [18]. Man unterscheidet zwei Arten von Wärmebrücken: die geometrische und die materialbedingte oder konstruktive Wärmebrücke.

Im Bereich der Wärmebrücke ist die Temperatur an der Wandaußenseite höher und an der Wandinnenseite niedriger als im jeweils ungestörten Wandbereich. Wärmebrücken sollten grundsätzlich soweit wie möglich vermieden werden, da sie einerseits einen Energieverlust und einen erhöhten Heizbedarf verursachen und andererseits auf der Wandinnenseite zur Bildung von Tauwasser und damit von Schimmelpilzen führen können.

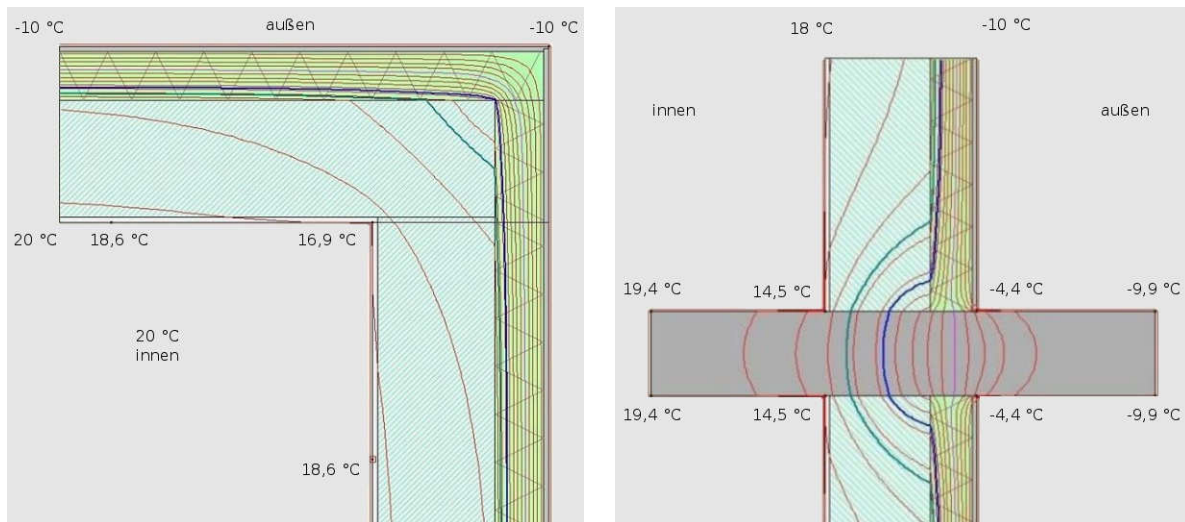


Abbildung 2.4: Links: geometrische Wärmebrücke; rechts: Mischform aus geometrischer und materialbedingter Wärmebrücke (jeweils mit Isothermen)

2.3.2 Geometrische Wärmebrücke

Bei geometrischen Wärmebrücken steht einer verhältnismäßig kleinen wärmeaufnehmenden Innenfläche eine wesentlich größere wärmeabgebende Außenfläche gegenüber [9]. Eine Vergrößerung der Außenfläche A bewirkt eine Vergrößerung des Wärmestroms Φ , vgl. Gleichung 2.2 auf Seite 9. Als Beispiel für eine geometrische Wärmebrücke ist in Abb. 2.4 links ein horizontaler Schnitt durch eine Außenwanddecke dargestellt. Die Lufttemperaturen betragen außen -10 °C und innen 20 °C . In der Innenecke stellt sich die niedrigste Oberflächentemperatur von $16,9\text{ °C}$ ein.

Geometrische Wärmebrücken, insbesondere an Gebäudeecken, können in der Planung nie vollständig vermieden werden. Damit ihr Einfluss gering ist und ihre Auswirkungen möglichst schadenfrei bleiben, sind genaue Kenntnisse über geometrische Wärmebrücken besonders wichtig.

2.3.3 Materialbedingte Wärmebrücke

Materialbedingte oder konstruktive Wärmebrücken treten dann auf, wenn innerhalb einer Außenwandkonstruktion nebeneinander verschiedene Baustoffe mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten zum Einsatz kommen. Abb. 2.2 auf Seite 12 zeigt beispielhaft einen Schnitt durch eine Außenwand eines Strohballenhauses mit Holzständerkonstruktion. Da das Holz eine höhere Wärmeleitfähigkeit als die Strohballen hat, findet über die Holzkonstruktion ein erhöhter Wärmetransport statt. Dies führt im Bereich der Holzkonstruktion zu niedrigeren Oberflächentempe-

raturen an der Wandinnenseite bzw. höheren Oberflächentemperaturen an der Wandaußenseite. Im Gegensatz zu geometrischen Wärmebrücken sind materialbedingte Wärmebrücken vermeidbar, indem Baustoffe mit ähnlichen Wärmeleiteigenschaften zum Einsatz kommen.

2.3.4 Mischform

Ein besonderes Problem stellen Konstruktionen dar, bei denen geometrische und materialbedingte Wärmebrücken gleichzeitig auftreten. In Abb. 2.4 ist rechts ein vertikaler Schnitt durch eine Außenwand mit durchgehendem Stahlträger dargestellt. Die Lufttemperaturen betragen außen -10 °C und innen 20 °C . In den Innenecken stellt sich die niedrigste Oberflächentemperatur von $14,5\text{ °C}$ ein.

Im Rahmen einer fachgerechten Planung und Ausführung sollte stets eine wärmebrückenarme Konstruktion erzielt werden, deshalb sind Kombinationen aus geometrischen und materialbedingten Wärmebrücken möglichst zu vermeiden. Wärmebrückenwirkungen im Bereich von Stahlträgerdurchführungen werden üblicherweise durch Hilfskonstruktionen thermisch entkoppelt, um die Wärmeleitung gezielt zu unterbrechen bzw. zu verringern [9].

3 Thermografie als Messmethode

3.1 Grundlagen der Thermografie

3.1.1 Überblick

Unter dem Oberbegriff Thermografie werden zwei sich ergänzende Sachverhalte zusammengefasst: Als Messverfahren handelt es sich bei der Thermografie um eine berührungslose und nichtpunktuelle Temperaturmessung. Darüber hinaus bezieht sich der Begriff Thermografie auf ein bildgebendes Verfahren, das Infrarotstrahlung sichtbar macht.

Mit Hilfe der Thermografie- oder Wärmebildtechnik wird die Intensität der entsendeten Eigenstrahlung eines Messobjekts gemessen und daraus die Temperatur der aussendenden Oberfläche ermittelt. Die farbliche Darstellung der Temperaturverteilungen auf Flächen und Gegenständen wird als Thermogramm bezeichnet.

In der Bautechnik findet die Thermografie im Wesentlichen zur Lokalisierung von Wärmebrücken¹ Anwendung [9]. Sie sind als Bereiche mit deutlich niedrigerer Oberflächentemperatur an der Innenseite einer Außenwand – bzw. deutlich höherer Oberflächentemperatur an der Außenseite einer Außenwand – im Thermogramm sichtbar.

3.1.2 Physikalisches Prinzip

Das Grundprinzip der Thermografie beruht darauf, dass jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes ($-273,15\text{ °C}$) eine Eigenstrahlung aussendet [9]. Nach dem Planckschen Strahlungsgesetz hängt die Wellenlänge der ausgesendeten Strahlung von der Temperatur des Körpers ab, vgl. Abb. 3.1. Die Sonne mit einer Temperatur von etwa 5777 K entsendet überwiegend sichtbares Licht; Körper mit wesentlich niedrigeren Temperaturen entsenden

¹ Im Bauwesen ist vor allem die Lokalisierung von Luftundichtigkeiten und Durchfeuchtungen, aber auch von Konstruktionseinzelheiten wie Fachwerkstrukturen oder Heizungsrohren von Interesse.

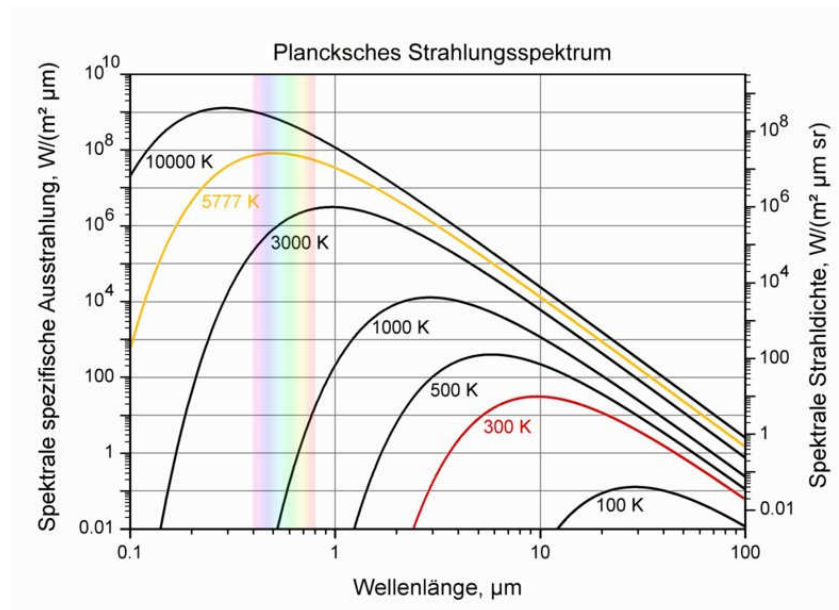


Abbildung 3.1: Plancksches Strahlungsgesetz

ausschließlich Wärmestrahlung (infrarote Strahlung). In der Bauthermografie ist der Temperaturbereich von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ von Relevanz. Das Ausstrahlungsmaximum liegt hier im Wellenlängenbereich von $9,8\text{ }\mu\text{m}$ bis $11,4\text{ }\mu\text{m}$, das heißt im infraroten Bereich.

3.1.3 Emissionsgrad

Der Emissionsgrad eines Körpers gibt an, wieviel Strahlung er im Vergleich zu einem idealen Wärmestrahler, einem schwarzen Körper, abgibt. Eine Vielzahl nichtmetallischer, nichtblanker Stoffe weisen in dem für die Bauthermografie relevanten Wellenlängenbereich der langwelligen Wärmestrahlung einen sehr hohen und nahezu konstanten Emissionsgrad von $\epsilon = 0,80\text{-}0,95$ auf. Bei Eichler werden die Emissionsgrade üblicher Baustoffe mit $0,90\text{-}0,94$ angegeben, vgl. Tabelle 3.1. Im Folgenden wird für die untersuchten Gebäude mit Oberflächen aus Lehm- oder Kalkputz der Emissionsgrad mit $\epsilon = 0,92$ (als Mittelwert) abgeschätzt.

Tabelle 3.1: Emissionsgrad ϵ einiger ausgewählter Baustoffe bei der Temperatur ϑ aus [6]

Material	ϑ (in $^{\circ}\text{C}$)	ϵ	Material	ϑ (in $^{\circ}\text{C}$)	ϵ
Beton	20	0,94	Holz	25	0,90
Mauerwerk	20	0,93	Dachpappe	20	0,90

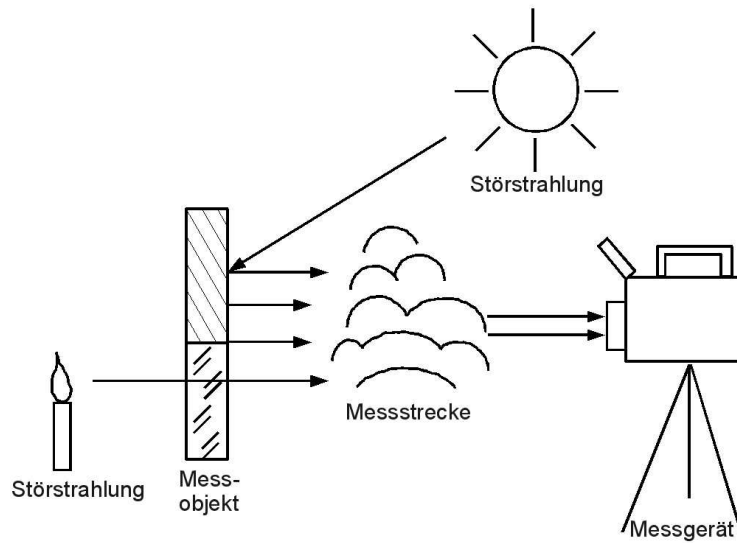


Abbildung 3.2: Einfluss der Atmosphäre und der Messumgebung aus [14]

3.1.4 Einfluss der Atmosphäre und der Umgebungsstrahlung

Gegenüber berührenden Temperaturmessverfahren sind bei der Thermografie einige physikalisch bedingte Besonderheiten zu beachten. So handelt es sich um ein optisches Prüfverfahren, bei dem die Oberfläche des Messobjektes vom Messgerät aus sichtbar sein muss. Neben diesen beiden Elementen der Messanordnung spielen aber auch die Beschaffenheit der Messstrecke sowie das Vorhandensein von Störstrahlungsquellen im Vorder- und ggf. im Hintergrund des Messobjektes eine entscheidende Rolle, vgl. Abb. 3.2.

Eine Störstrahlungsquelle ist ein Objekt im Umfeld des Messobjektes, das eine wesentlich höhere oder niedrigere Temperatur als das Messobjekt besitzt. Aufgrund der Temperaturdifferenz findet ein Strahlungsaustausch zwischen beiden Objekten statt, sodass das Messgerät die Eigenstrahlung des Messobjektes nicht fehlerfrei messen kann. Typische Störstrahlungsquellen sind Heizkörper und die Sonne (mit einer wesentlich höheren Strahlungstemperatur), aber auch der wolkenlose Himmel (mit einer wesentlich niedrigeren Strahlungstemperatur).

Bei thermografischen Messungen ist in Bezug auf die Messstrecke zu beachten, dass die vom Körper abgestrahlte Energie die Atmosphäre durchdringt und von dieser geschwächt wird, bevor sie vom Messgerät detektiert wird [9]. Moleküle (im Wesentlichen Wasserdampf und Kohlendioxid) und Schwebstoffe absorbieren, reflektieren und streuen die vom Messobjekt abgestrahlte Energie. Dieser Einfluss ist um so stärker, je weiter das Messobjekt vom Messgerät entfernt ist.

Darüber hinaus wurde festgestellt, dass das Transmissionsverhalten von Wasserdampf und Kohlendioxid wellenlängenabhängig ist und im Wellenlängenbereich von $8\ \mu\text{m}$ bis $14\ \mu\text{m}$ mit annähernd 100 Prozent ein Optimum aufweist [23]. Aus diesem Grund werden Thermografiekameras für die Anwendung im Bauwesen für diesen Spektralbereich optimiert².

3.2 Durchführung thermografischer Messungen

3.2.1 Außen- und Innenmessungen

Im Bereich der Gebäudethermografie kommen sowohl Außen- als auch Innenmessungen zum Einsatz. Beide Messanordnungen haben ihre Vor- und Nachteile, die in Tab. 3.2 zusammengefasst sind.

Außenaufnahmen sind plakativer und liefern einen guten Überblick über einen größeren Flächenbereich eines Gebäudes. Sie sind weniger aufwändig als Innenaufnahmen, liefern allein aber kein vollständiges Bild aller möglichen Schwachstellen. Außenmessungen sind meist ohne große Vorbereitung und ohne eine Belästigung der BewohnerInnen durchführbar. Allerdings können hinterlüftete Fassaden und Dächer nicht mit Außenaufnahmen analysiert werden. Hinterlüftete Bauteile besitzen nahezu Umgebungstemperatur – ihre Oberflächentemperaturmessung gibt keinen Aufschluss über den Zustand der gesamten Außenwand. Nachteilig ist außerdem, dass Außenmessungen stark witterungsabhängig sind und daher nicht zu jeder Tageszeit durchgeführt werden können.

Innenmessungen werden von der Witterung weniger beeinflusst und sind zeitlich flexibler einsetzbar. Durch die bessere Temperaturauflösung werden vorhandene Wärmebrückenphänomene in Innenaufnahmen meist detailreicher dargestellt. Ist die Ansicht durch Möbel verstellt, so ist eine erhöhte Vorbereitung nötig. In jedem Fall bleibt die Untersuchung auf ein Detail beschränkt, aus Platzgründen sind keine Überblicksaufnahmen möglich. Innenmessungen eignen sich besonders gut für die Untersuchung hinterlüfteter Bauteile, da mit Hilfe der Oberflächentemperaturmessung eine Aussage über den Zustand der Außenwand getroffen werden kann.

Für eine aussagekräftige Analyse eines Gebäudes sind sowohl Außen- als auch Innenaufnahmen notwendig, da nur die Kombination aus diesen beiden Messanordnungen eine ganzheitliche Einschätzung der Schwachstellen eines Gebäudes zulässt.

² vgl. Tabelle 3.3 auf Seite 24

Tabelle 3.2: Unterschiede zwischen Außen- und Innenmessungen aus [14]

Außenthermografie	Innenthermografie
+ in der Regel wärmeabgebende Wand vollständig einsehbar (meist guter Überblick)	– nur kleiner Teil der Wände erfassbar, wesentliche Teile der Flächen können nicht erfasst werden
+ Aufnahmeposition meist variabel	– meist Ansicht durch Möbel und sonstige Einrichtung eingeschränkt
+ geringerer Zeitaufwand, keine Belästigung	– größerer Vorbereitungsaufwand, Belästigung der NutzerInnen
– stark witterungsabhängig	+ kein direkter Einfluss der unmittelbaren Witterungseinflüsse (Wirkung abgeschwächt), unter bestimmten Voraussetzungen auch am Tag durchführbar
– problematisch bei Messungen im Dachgeschoss und hinterlüfteter Fassaden	+ bessere Aussagen bei ausgebauten Dachgeschossen sowie hinterlüfteten Fassaden
– Verdeckung von Fassadenteilen durch Balkone, Bäume usw.	+ Luftundichtigkeiten bei Wind leichter auszumachen

3.2.2 Verwendete Thermografiertechnik

Das verwendete Infrarot-Thermografiesystem ist die VARIOSCAN high resolution, Typ 3021 St, von InfraTec. Es handelt sich hierbei um eine für den langwelligen Spektralbereich optimierte Scannerkamera. Die wichtigsten technischen Daten sind in Abb. 3.3 zusammengefasst. Mit Hilfe der Thermografie-Software IRBIS wurden die Thermogramme nachbearbeitet.

3.2.3 Wärmebrücken im Thermogramm

Eine Wärmebrücke ist eine örtlich begrenzte Stelle in einem Außenbauteil, an dem ein erhöhter Wärmefluss stattfindet. Im Thermogramm einer Außenmessung sind Wärmebrücken durch eine höhere Oberflächentemperatur lokalisierbar, bei einer Innenmessung durch eine niedrigere. Aber nicht jede Temperaturdifferenz stellt automatisch einen Hinweis auf einen Mangel dar [25].



Technische Daten	Typ 3021 St
Spektr. Messbereich	8 – 12 μm
Detektorkühlung	Stirling-Kühler
Temperaturmessbereich	-40 – 1200 °C
Temperaturauflösung	$\pm 0,03\text{ K}$
Geometr. Auflösung	1,5 mrad
Bildpunktanzahl	360 x 240 Pixel
Bildaufnahmefrequenz	1, 2 und 5 Hz

Abbildung 3.3: Überblick über die technischen Daten der VARIOSCAN high resolution, Typ 3021 St, von InfraTec aus [15]

In Kap. 2.3 auf Seite 15 wurde bereits auf die Systematik von Wärmebrücken eingegangen. Geometrische und materialbedingte Wärmebrücken lassen sich sowohl in Außen- als auch in Innenaufnahmen lokalisieren, wobei Innenmessungen Wärmebrücken detailreicher abbilden, da die Temperaturlösung besser ist. Nachfolgend soll ein Kriterium formuliert werden, anhand dessen eine Bewertung von Wärmebrücken im Thermogramm vorgenommen werden kann.

Um einschätzen zu können, ab wann eine Wärmebrücke als kritisch einzustufen ist, wird üblicherweise die Temperatur im kritischen Bereich mit der Temperatur im ungestörten Wandbereich verglichen. Ist die Konstruktion schadenfrei, so beträgt die Temperaturdifferenz laut Fouad und Richter nicht mehr als 2-3 K und steigt (bzw. fällt) zugleich außerhalb des Bereiches rasch wieder an (bzw. ab) [9]. Darüber hinaus ist eine schadenfreie Wärmebrücke dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur im angrenzenden, ungestörten Wandbereich eher gleich bleibend und einheitlich verläuft. Ist die Temperaturdifferenz jedoch größer als 3 K, so ist die Wärmebrücke als kritisch einzustufen. Um zu überprüfen, ob die betreffende Schwachstelle einen Schaden verursacht, muss das Bauteil eingehender untersucht und ggf. mit anderen Rechenverfahren zur Überprüfung von Wärmebrücken berechnet werden.

3.3 Fehleranalyse

Die Thermografie hat viele Anwendungsbereiche und als Temperaturmessmethode viele Vorzüge, wie die berührungslose und nichtpunktuelle Messung. Eng damit verknüpft sind allerdings einige Nachteile, die im Folgenden kurz diskutiert werden.

3.3.1 Meteorologische Randbedingungen

Thermografiermessungen zur Wärmebrückenanalyse sind nur in der kalten Jahreszeit möglich. In der Fachliteratur sind Werte zwischen 15 und 20 K als notwendige Temperaturdifferenz zwischen innen und außen angegeben (z. B. 20 °C Innentemperatur und 0 °C Außentemperatur). Da die Sonnenstrahlung sich mit der Eigenstrahlung des Gebäudes überlagert und somit als Störstrahlungsquelle wirkt, sollte das Gebäude über einen Zeitraum von 12 Stunden keiner Sonneneinstrahlung ausgesetzt worden sein. Daher ist ein bewährter Termin für die Messung der frühe Morgen vor Sonnenaufgang. Messungen bei wolkenlosem Himmel sollten aus demselben Grund vermieden werden. Die Strahlungstemperatur des Himmels ist in diesem Fall wesentlich niedriger als die Lufttemperatur, daher findet ein Strahlungsaustausch zwischen Gebäude und Himmel statt, sodass die Eigenstrahlung des Gebäudes nicht ungestört gemessen werden kann. Um Verrauschungen zu vermeiden, sollten keine Messungen bei starkem Wind, Nebel, Regen oder Schnee durchgeführt werden. Außerdem sollte der Messabstand so klein wie möglich gewählt werden. Um möglichst einheitliche Ergebnisse zu erzielen, sollten die Innenräume des Gebäudes bereits im Vorfeld der Messung gleichmäßig und ausreichend beheizt sein.

Da im Rahmen dieser Arbeit auch Thermogramme diskutiert werden, die nicht bei bedecktem Himmel aufgenommen worden sind, soll im Folgenden kurz erläutert werden, welchen Einfluss der Strahlungsaustausch mit der Umgebung auf die gemessenen Oberflächentemperaturen hat. In den Thermogrammen, die bei wolkenlosem Himmel aufgenommen worden sind, liegen die gemessenen Oberflächentemperaturen teilweise unterhalb der Lufttemperatur. Dies betrifft vor allem Fassadenflächen, die nicht durch Dachvorsprünge, Vordächer, Bäume oder andere Gebäude in der Nähe des untersuchten Gebäudes geschützt oder verdeckt sind. Die Oberflächentemperatur einer ungeschützten Fassade, die in einem erhöhten Strahlungsaustausch steht, liegt in einem Fall um 3-4 K niedriger als die einer geschützten Fassade desselben Gebäudes³. Bäume oder andere Gebäude vor einer Fassade, die im Strahlungsaustausch mit dem wolkenlosen Himmel steht, bewirken, dass im Bereich der oberen Etagen niedrigere Oberflächentemperaturen gemessen werden als im Bereich der unteren Etagen.

Beispiele für Thermogramme, die bei wolkenlosem Himmel aufgenommen worden sind, sind in Abb. 5.4 auf Seite 47 und in Abb. 5.7 auf Seite 51 zu sehen. Im Gegensatz dazu ist in Abb. 5.1 auf Seite 43 ein Thermogramm dargestellt, das bei bedecktem Himmel aufgenommen worden ist. Da in diesem Fall die Strahlungstemperatur des Hintergrundes nahe der Lufttemperatur liegt, kann der Einfluss der Messumgebung auf die gemessene Oberflächentemperatur vernachlässigt werden.

³ vgl. Abb. 5.7 auf Seite 51

3.3.2 Emissionsgrad

Die Emissionsgrade der zu thermografierenden Oberflächen sollten bekannt sein. Ohne Angabe des richtigen Emissionsgrades ermittelt eine Thermografiekamera nur die Temperatur, die ein schwarzer Körper besitzen müsste, um diese Strahlungsleistung zu emittieren. Ein schwarzer Körper besitzt einen Emissionsgrad von $\varepsilon = 1$ für alle Wellenlängen, wohingegen dieser Wert bei den zu vermessenden Materialien sehr unterschiedlich sein kann. Das Ergebnis muss also mit Hilfe des richtigen Emissionsgrades korrigiert werden, um die korrekte Temperatur zu erfahren. Wenn mehrere Materialien in einem Thermogramm sehr verschiedene Emissionsgrade besitzen, kann stets nur eines mit der korrekten Temperaturverteilung dargestellt werden. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Gebäude mit Oberflächen aus Lehm- oder Kalkputz wird der Emissionsgrad mit $\varepsilon = 0,92$ abgeschätzt, vgl. Kap 3.1.3 auf Seite 20. Eine Abweichung des Emissionsgrades um $\Delta\varepsilon = 0,01$ bewirkt eine Oberflächentemperaturänderung von $\Delta\theta = 0,04\text{K}$. Daraus folgt, dass die Temperaturen von Oberflächen mit stark von $\varepsilon = 0,92$ abweichenden Emissionsgraden, z. B. Glas, nicht korrekt dargestellt werden und deshalb nicht für die Auswertung der Thermogramme herangezogen werden können.

3.3.3 Rechnerische Überprüfung der Messgenauigkeit

Inwiefern die mit Hilfe der Thermografie gemessenen Temperaturen die korrekten Oberflächentemperaturen wiedergeben, soll anhand einer Rechnung abgeschätzt werden. In Abb. 5.8 auf Seite 53 ist ein Thermogramm dargestellt, das eine Besonderheit aufweist, anhand derer überprüft werden kann, wie exakt die Thermografie als Temperaturmessmethode ist. Das Thermogramm ist bei bedecktem Himmel aufgenommen worden, der Einfluss der Messumgebung kann also vernachlässigt werden. Rechts im Bild sind zwei Regentonnen zu erkennen, die zum Zeitpunkt der Messung mit Eiswasser gefüllt waren. Das heißt, dass die Lufttemperatur in den Stunden vor der Messung unterhalb des Gefrierpunktes gelegen haben muss. Das Eiswasser hat eine Temperatur von $0\text{ }^\circ\text{C}$. Dieser Wert soll im Folgenden als Referenzwert für die Temperaturmessung dienen.

In der mit Eiswasser gefüllten Regentonne stellt sich eine Temperaturverteilung ein, wie sie in Abb. 3.4 dargestellt ist. Unter der Annahme, dass die Temperatur des Eiswassers $\theta_i = 0\text{ }^\circ\text{C}$ und die Temperatur der Außenluft $\theta_e = 4,0\text{ }^\circ\text{C}$ beträgt, kann mit Hilfe der Gesetzmäßigkeiten für die stationäre Wärmeleitung und für den konvektiven Wärmeübergang die Temperatur an der Außenseite der Tonne θ_{se} berechnet werden. Dieser Rechenwert soll mit den mit Hilfe der Thermografie gemessenen Werten für die Oberflächentemperatur der Tonne verglichen werden. Stimmt er überein, so spricht dies für eine hohe Genauigkeit der Messmethode.

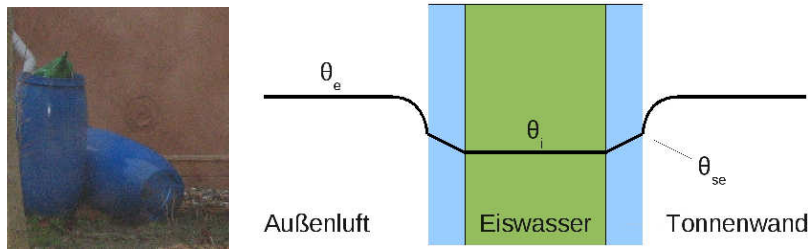


Abbildung 3.4: Links: mit Eiswasser gefüllte Regentonnen [Foto: privat]; rechts: Temperaturverteilung (Zeichnung nicht maßstäblich)

Für den Wärmetransportvorgang von der Außenluft an das Eiswasser gilt die Wärmeleitungsgleichung [1]

$$\Phi = \lambda_{Tonne} A_{Tonne} \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)_{Tonne} \quad (3.1)$$

sowie die Gleichung für den konvektiven Wärmeübergang an einer thermischen Grenzschicht

$$\Phi = h_e A_{Tonne} (\theta_e - \theta_{se}) \quad (3.2)$$

Annahmen:

1. Es findet nur Wärmeleitung in horizontaler Richtung statt (eindimensionale Wärmeleitung in y-Richtung).
2. Der Temperaturverlauf in der Tonnenwand ist linear.
3. Die Wandstärke der Tonne d_{Tonne} beträgt 0,005 m.
4. Die Wärmeleitfähigkeit der Tonne λ_{Tonne} entspricht der Wärmeleitfähigkeit von Polyethylen (PE-HD) ($\lambda_{Tonne} = \lambda_{PE-HD} = 0,42 \frac{W}{mK}$) [16].
5. Der Wärmeübergangskoeffizient von der Tonnenwand an die Außenluft h_e beträgt $25 \frac{W}{m^2K}$ [1].
6. Die Wandinnentemperatur θ_{si} entspricht der Wassertemperatur θ_i von $0^\circ C$.
7. Die Außentemperatur θ_e beträgt $4,0^\circ C$.
8. Der Emissionsgrad der Tonne entspricht dem Emissionsgrad von Kunststoff und beträgt $\varepsilon = 0,92$ [6].

Da die Wärmeströme Φ aus den Gleichungen (3.1) und (3.2) gleich groß sein müssen, ergibt sich durch Gleichsetzen:

$$q = \frac{\Phi}{A_{Tonne}} = \frac{\lambda_{Tonne}}{d_{Tonne}} (\theta_{se} - \theta_i) = h_e (\theta_e - \theta_{se}) \quad (3.3)$$

Thermografie als Messmethode

Diese Gleichung wird nach der Außenwandtemperatur θ_{se} aufgelöst:

$$\theta_{se} = \frac{h_e d_{Tonne} \cdot \theta_e + \lambda_{Tonne} \cdot \theta_i}{h_e d_{Tonne} + \lambda_{Tonne}} \quad (3.4)$$

Nach Einsetzen aller Werte ergibt sich:

$$\theta_{se} = \frac{25 \frac{W}{m^2 K} 0,005 m \cdot 277,15 K + 0,42 \frac{W}{m K} \cdot 273,15 K}{25 \frac{W}{m^2 K} 0,005 m + 0,42 \frac{W}{m K}} \quad (3.5)$$

$$\theta_{se} = 274,07 K \quad (3.6)$$

Die Kelvin-Temperatur von $274,07 K$ entspricht einer Celsius-Temperatur von $0,9 ^\circ C$. Dieser rechnerisch ermittelte Wert stimmt gut mit den mit Hilfe der Thermografie bestimmten Messwerten von $0,5-1,3 ^\circ C$ überein (vgl. Kap. 5.3.4 auf Seite 52). Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das Thermogramm, das in Abb. 5.8 dargestellt ist, die Oberflächentemperaturen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,4 K$ wiedergibt.

3.3.4 Zusammenfassung

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Thermografie nur dann zur Bestimmung der Oberflächentemperaturen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,4 K$ geeignet ist, wenn **alle** der folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Die meteorologischen Randbedingungen, die in Kap. 3.3.1 aufgezählt werden, werden eingehalten.
2. Die Messung findet bei bedecktem Himmel statt, so dass der Einfluss der Messumgebung vernachlässigt werden kann.
3. Der Messabstand wird so klein wie möglich gewählt.
4. Es wird der richtige Emissionsgrad angegeben.

Ist eine der Voraussetzungen nicht erfüllt, so können lediglich die Temperaturdifferenzen innerhalb eines Thermogramms bestimmt und für eine wärmetechnische Analyse herangezogen werden.

4 Wärmedämmung von Strohhallenhäusern

4.1 Konstruktionsarten des Strohhallenbaus

4.1.1 Überblick

Häuser aus Strohhallen wurden seit der Erfindung der Strohhallenpresse am Ende des 19. Jahrhunderts gebaut [21]. Die ersten Bauten in lasttragender Bauweise entstanden im holzarmen Bundesstaat Nebraska in den USA. Einige Gebäude sind heute immer noch erhalten.

Grundsätzlich wird im Strohhallenbau zwischen zwei Konstruktionsarten unterschieden: der lasttragenden und der nicht lasttragenden Bauweise, vgl. Abb. 4.1. Bei der lasttragenden Strohhallenbauweise bestehen die Wände gänzlich aus verputzten Strohhallen, die wie Mauersteine aufeinander geschichtet werden und die Dachlast ohne Stützen in die Fundamente ableiten. Bei der nicht lasttragenden Bauweise bildet ein Holzständerwerk das Tragwerk und die Zwischenräume (Gefache) werden mit Stroh ausgefüllt. Die Strohhallen übernehmen lediglich die Funktion der Wärmedämmung und des Wandabschlusses. Diese Konstruktionsart wird Holzständer- oder Holzrahmenkonstruktion genannt. Darüber hinaus gibt es einige Mischformen [19].

4.1.2 Lasttragende Bauweise

Die lasttragende Bauweise eignet sich für das Errichten von ein- bis zweigeschossigen Gebäuden [12]. Dabei werden die Ballen wie Ziegel im Versatz aufgeschichtet und mit Stangen aus Stahl, Holz oder Bambus gegen das Verrutschen miteinander verbunden. Über einen Ringanker aus Holz wird die Dachlast gleichmäßig auf die Wand verteilt. Die Strohhallenwände werden nach dem Aufbringen des Ringankers komprimiert und nach einer Setzzeit von 4-6 Wochen

Wärmedämmung von Strohballenhäusern



Abbildung 4.1: Links: Strohballenhaus in lasttragender Bauweise; rechts: Strohballenhaus mit TJI-Trägerkonstruktion und Strohballenausfachung [Fotos: privat; R. Schilk]

beidseitig verputzt. Dass hierbei der Putz die Funktion der Windaussteifung¹ übernimmt, konnte zwar im Rahmen internationaler Tests bereits nachgewiesen werden [17]. Eine Anerkennung dieser Testergebnisse in der Bundesrepublik steht allerdings noch aus. Deshalb ist hierzulande eine Baugenehmigung fast ausschließlich für die Holzständerbauweise zu bekommen, während in anderen Ländern viele Gebäude in lasttragender Bauweise errichtet werden.

Strohballenhäuser in lasttragender Bauweise sind sehr selbstbaufreundlich und können unter Anleitung auch von Menschen ohne Bauerfahrung in kurzer Zeit errichtet werden. Aus wärmetechnischer Sicht sind sie besonders sinnvoll, da kaum materialbedingte Wärmebrücken auftreten.

4.1.3 Holzständerbauweise

Bis zu dreigeschossige Gebäude sind bisher in Holzständer- oder Holzrahmenbauweise errichtet worden. Bei dieser Bauweise wird die Dachlast von einem Holzständerwerk getragen und die Zwischenräume werden mit Stroh ausgefüllt. Die Windaussteifung wird durch Aussteifung der Holzkonstruktion mit Hilfe von Streben oder Windrispenbändern oder durch Heranziehen der Innenwände herbeigeführt.

Innerhalb der Strohballenwand sind unterschiedliche Positionen der Holzständer möglich, wie Abb. 4.2 zeigt. Aus wärmetechnischer Sicht sind die Konstruktionen sinnvoll, bei denen die

¹ Die Windaussteifung oder Horizontalaussteifung ist die Sicherung eines Bauwerks gegen Verformung oder Zusammenstürzen aufgrund von Horizontalkräften (Windkräften).

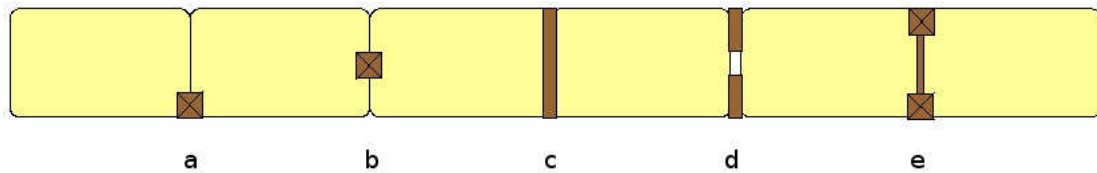


Abbildung 4.2: Unterschiedliche Lage von Strohballen und Skelettstrukturen: a - innen stehender Holzständer, b - mittig stehender Holzständer, c - durchgehende Bohle, d - innen und außen stehende Bohle, e - TJI-Träger

Holzständer innen bündig in der Strohballenwand (a) oder mittig innerhalb der Strohballen (b) stehen. Einfacher – auch in Vorfertigung – zu konstruieren sind hingegen die Konstruktionen mit durchgehenden Bohlenständern (c). Da die durchgehende Bohle eine materialbedingte Wärmebrücke innerhalb der Strohballenwand darstellt, ist diese Technik weiterentwickelt worden, um die Wärmebrückenwirkung der Holzkonstruktion zu minimieren. Beispiele hierfür sind die außenseitige Überdämmung des Bohlenständers mit 2 cm Weichfaser, die Anordnung zwei hintereinander stehender Bohlen mit einem dazwischen liegenden Luftspalt (d) oder die Verschlangung der stärker wärmeleitenden Schicht durch den Einsatz von TJI-Trägern (e).

Die Holzständer- oder Holzrahmenkonstruktion hat gegenüber der lasttragenden Bauweise den Vorteil, dass der Bauprozess wetterunabhängiger gestaltet werden kann, sodass die Gefahr geringer ist, dass die Strohballen nass werden. Hierbei gibt es verschiedene Möglichkeiten des Vorgehens. Entweder wird zuerst das Dach errichtet, bevor mit dem Ausfüllen der Zwischenräume mit Strohballen begonnen wird. Oder die Wandelemente werden einzeln – und vor Regen geschützt – vorgefertigt und anschließend in kurzer Zeit von einem Kran errichtet.

4.2 Balleneigenschaften

4.2.1 Rohstoff

Als Stroh wird die getrocknete Pflanzenstruktur zwischen Wurzelstamm und Ähre von gedroschenem Getreide oder Faserpflanzen bezeichnet [19]. Dazu zählen die Stängel von Getreidesorten wie Roggen, Dinkel, Weizen, Gerste, Hafer und Hirse, sowie die Stängel von Faserpflanzen wie Flachs, Hanf, Schilf und Reis.

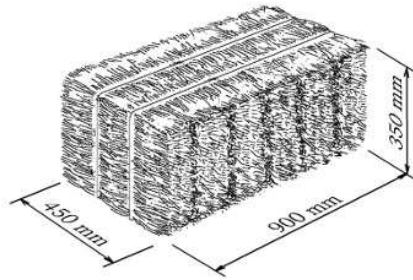


Abbildung 4.3: Typische Abmessungen eines Kleinstrohballens

4.2.2 Abmessungen

Üblicherweise kommen Kleinstrohballen zum Einsatz, vgl. Abb. 4.3. Die Höhe variiert zwischen 32 und 35 cm, die Breite zwischen 45 und 50 cm und die Länge zwischen 50 und 120 cm. Vereinzelt wird auch mit größeren Ballen gearbeitet.

Beim Pressen von Strohballen ist neben der richtigen Abmessung darauf zu achten, dass die Ballendichte mindestens 90 kg/m^3 und der Feuchtegehalt weniger als 15 Prozent beträgt, dass die Strohballen maßhaltig sind und dass der Anteil an Verunreinigung durch Kräuter gering ist [19].

4.2.3 Einbaulage

Bei Strohballenhäusern kommen alle drei möglichen Ballenorientierungen, wie sie in Abb. 4.4 dargestellt sind, zum Einsatz. Während bei Holzständerkonstruktionen die Ballen meistens aufrecht stehend (a) oder hochkant liegend (b) zwischen die Holzständer eingebracht werden, finden bei lasttragenden Konstruktionen flach liegende Ballen (c) Verwendung. Dabei ist zu beachten, dass der rechnerische Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ_R bei beiden Konstruktionsarten unterschiedlich ist. Er beträgt in Halmrichtung $0,08 \text{ W/mK}$ (c) und quer zur Halmrichtung $0,052 \text{ W/mK}$ (a, b). Bei der Verwendung flach liegender Ballen wird der Nachteil des schlechteren Wertes für die Wärmeleitfähigkeit jedoch dadurch wieder ausgeglichen, dass die Wand um 10-15 cm dicker ist.

4.2.4 Feuchtigkeit

Strohballen dürfen niemals feucht werden, da sie sonst ihre Dämmwirkung verlieren und das Risiko besteht, dass sich Schimmelpilze bilden. Deshalb muss von der Ernte des Stroh bis zum

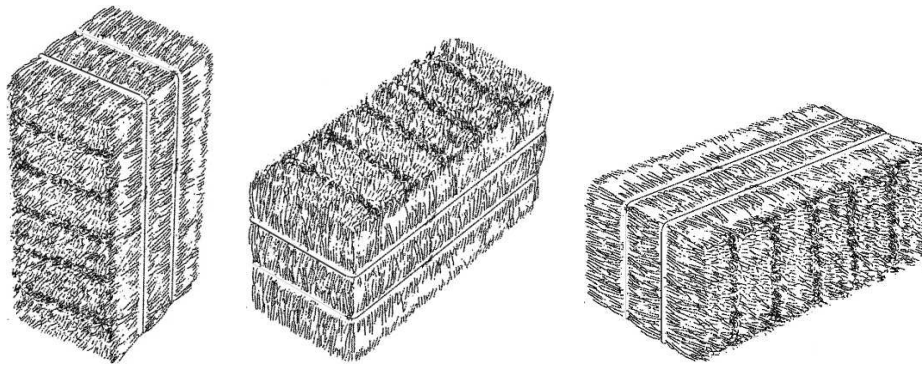


Abbildung 4.4: Einbaulage der Strohballen: a - aufrecht stehend; b - hochkant liegend; c - flach liegend

Einbau der Ballen darauf geachtet werden, dass das Stroh vor Feuchtigkeit geschützt ist. Darüber hinaus muss bei der Konstruktion eines Strohballenhauses besonders auf konstruktiven Feuchteschutz Wert gelegt werden, zum Beispiel auf einen ausreichenden Dachüberstand sowie eine Feuchtigkeitssperre gegenüber dem Boden. Die Außenwände, vor allem die Westfassade, werden manchmal mit einer hinterlüfteten Holzschalung versehen, um die Strohballenwände gegen Wettereinflüsse zu schützen.

Um zu verhindern, dass sich innerhalb einer Konstruktion Kondenswasser bildet, werden Strohballenwände in der Regel diffusionsoffen² errichtet. Feuchtigkeit, die im Inneren eines Gebäudes anfällt, kann so leicht durch die Gebäudehülle nach außen abtransportiert werden. Ein idealer Innenputz eines Strohballenhauses besteht aus Lehm, aufgebracht in mehreren Lagen. Steigt die Raumlufftfeuchte für kurze Zeit stark an, so kann Lehm die eindringende Feuchtigkeit rasch aufnehmen und später wieder abgeben. Neben Lehmputz wird in der Bundesrepublik häufig Kalkputz als Außenputz verwendet. In einigen anderen Ländern kommt auch Zementputz zum Einsatz.

4.3 Wärmedämmung und potentielle Wärmebrücken

4.3.1 Wärmedurchgangskoeffizient

Zur energetischen Betrachtung von Strohballenhäusern soll im Folgenden auf die Berechnung der typischen Wärmedurchgangskoeffizienten U von Außenwänden eingegangen werden. Ab-

² Der Einsatz diffusionsoffener Bauteile ermöglicht den Durchgang von Wasserdampf und vermeidet, dass durch Kondensation Schäden an Bauteilen entstehen [22].

Wärmedämmung von Strohballenhäusern

hängig von der Wärmeleitfähigkeit, die je nach Halmrichtung unterschiedlich ist, werden im Wesentlichen zwei Fälle unterschieden:

1. Bei Holzständerkonstruktionen werden in der Regel aufrecht stehende und hochkant liegende Ballen eingesetzt, sodass der Wärmetransportvorgang quer zur Halmrichtung stattfindet und die günstigere Wärmeleitfähigkeit λ_R von $0,052 \text{ W/mK}$ zugrunde gelegt werden kann. Unter Verwendung von Kleinstrohballen mit einer Dicke von $d = 35 \text{ cm}$ beträgt der Wärmedurchgangskoeffizient U für diesen Fall $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$, vgl. Tab. 4.1.
2. Für den lasttragenden Strohballenbau – und für einige Holzständerkonstruktionen – werden flach liegende Ballen verwendet. Dabei findet der Wärmetransport in Halmrichtung statt und es wird eine Wärmeleitfähigkeit λ_R von $0,08 \text{ W/mK}$ zugrunde gelegt. Unter Verwendung von Kleinstrohballen mit einer Dicke von $d = 50 \text{ cm}$ beträgt der Wärmedurchgangskoeffizient U für diesen Fall ebenso $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$, vgl. Tab. 4.2.

Das Verfahren zur Berechnung des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U einer inhomogenen Schicht, der in den Tabellen 4.1 und 4.2 in der jeweils letzten Zeile angegebenen ist, wurde in Kap. 2.2.5 auf Seite 11 beschrieben. In diesem Kapitel wurde ein Strohballenhaus in Bohlenständerbauweise betrachtet, für welches Strohballen mit einer Dicke d von nur 30 cm verwendet worden sind. Der U -Wert dieses Strohballenhauses beträgt knapp $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Alle anderen Strohballenhäuser, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht worden sind, weisen größere Ballenabmessungen auf und besitzen somit kleinere U -Werte.

4.3.2 Vergleich des Energiestandards bei Strohballenhäusern

Die Außenwände von Strohballenhäusern verfügen mit U -Werten unter $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ über eine sehr gute Wärmedämmung und erfüllen somit die Anforderungen an ein Niedrigenergiehaus³. Zusätzlich zu den Außenwänden kann auch das Dach mit Strohballen oder anderen Naturdämmstoffen gedämmt werden. Niedrigenergiestandard wird nur dann erreicht, wenn die Gebäudehülle lückenlos wärmegeklämmt ausgeführt wird, d. h. wenn neben der Außenwand auch alle weiteren Außenbauteile wie Fenster, Türen, Fußboden und Dach den Niedrigenergiestandard erfüllen.

³ Gabriel und Ladener geben U -Werte zwischen $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$ für Außenwände von Niedrigenergiehäusern an [10].

Tabelle 4.1: Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U für eine typische Holzständerkonstruktion (aus [19], Wert für $\lambda_{\text{Strohballen}}$ aktualisiert)

	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Wärmedurchlasswiderstand $R = d/\lambda$ [m^2K/W]
R_{si}			0,130
Lehmputz	0,03	0,800	0,038
Strohballen stehend	0,35	0,052	6,731
Kalkputz	0,03	0,870	0,034
R_{se}			0,040
R_T	0,41		6,973
$U = 1/R_T$ (ohne Holz)			0,14 W/ m^2K
U inklusive Holzkonstruktion (10%) ^a			0,16 W/ m^2K

^a Das Verfahren zur Berechnung des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten U einer inhomogenen Schicht wurde in Kap. 2.2.5 auf Seite 11 beschrieben.

Tabelle 4.2: Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U für eine typische lasttragende Strohballenwand (aus [19], Wert für $\lambda_{\text{Strohballen}}$ aktualisiert)

	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Wärmedurchlasswiderstand $R = d/\lambda$ [m^2K/W]
R_{si}			0,130
Lehmputz	0,03	0,800	0,038
Strohballen liegend	0,50	0,080	6,250
Kalkputz	0,03	0,870	0,034
R_{se}			0,040
R_T	0,56		6,492
$U = 1/R_T$ (ohne Holz)			0,15 W/ m^2K
U inklusive Holzkonstruktion (6%) ^a			0,16 W/ m^2K

^a Dass auch bei lasttragenden Strohballenwänden ein geringfügiger Holzanteil berücksichtigt werden muss, ergibt sich durch die Verwendung eines Ringankers.

4.3.3 Bewertung der Holzständerkonstruktion

Streng genommen stellen Holzständerkonstruktionen – und unter ihnen vor allem die Bohlenständerbauweise – potentielle Wärmebrücken dar, da über die Holzkonstruktion ein zusätzlicher Wärmestrom abfließt. Es stellt sich jedoch die Frage, welchen Einfluss dieser zusätzliche Wärmestrom auf die energetische und allgemeine Bewertung des Strohhallenhauses hat. Der in Kap. 2.2.5 berechnete mittlere Wärmedurchgangskoeffizient U einer Bohlenständerbauweise lässt vermuten, dass es sich bei den Bohlenständern – und damit auch bei allen anderen Holzständerkonstruktionen – um schadenfreie Wärmebrücken handelt.

Fehlerbewertung

Um zu überprüfen, inwiefern der in Kap. 2.2.5 auf Seite 11 berechnete mittlere Wärmedurchgangskoeffizient U vom tatsächlichen U-Wert der Außenwand abweicht, soll die Berechnung einer Fehlerbewertung unterzogen werden. Dabei werden die beiden Grenzwerte des Wärmedurchgangswiderstands R'_T und R''_T miteinander verglichen und es wird überprüft, ob der Unterschied zwischen diesen beiden Grenzwerten nicht zu groß ist.

In der DIN EN ISO 6946 wird vorgeschlagen, einen maximale Fehler e des Wärmedurchgangswiderstands R_T zu bestimmen. Ist e größer als 10 Prozent, so müsste die inhomogene Schicht als Wärmebrücke behandelt werden. In diesem Fall wird empfohlen, dass das Bauteil mit anderen Rechenverfahren zur Überprüfung von Wärmebrücken berechnet wird [24].

Für das Beispiel in Kap. 2.2.5 lässt sich e nach [5] wie folgt berechnen:

$$e = \frac{R'_T - R''_T}{R_T} \cdot 100 \% = 0,81 \% \quad (4.1)$$

Der maximale Fehler im vorliegenden Beispiel ist mit 0,81 % mehr als eine Zehnerpotenz kleiner als 10 %. Die Vermutung, dass es sich bei der Bohlenständerkonstruktion um eine schadenfreie Wärmebrücke handelt, wird damit bestätigt.

Einen weiteren Hinweis auf die Schadenfreiheit dieser Wärmebrücke liefert der Vergleich der Grenzwerte $U' = 0,197 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $U'' = 0,199 \text{ W/m}^2\text{K}$. Der Wärmedurchgangskoeffizient U musste mit drei Nachkommastellen angegeben werden, um überhaupt einen Unterschied erkennen zu können. Normalerweise wird der U-Wert mit zwei Nachkommastellen angegeben.

Virtuelle Energieanalyse

Eine andere Interpretationsmöglichkeit bietet die Abschätzung des Differenzwärmestroms, der zusätzlich über die Bohlen abfließt. Auch hierfür wird die Berechnung in Kap. 2.2.5 zugrunde gelegt. Bei der Bestimmung des Differenzwärmestroms handelt es sich allerdings um einen theoretischen Rechenwert, für den der U-Wert des Hauses in Bohlenständerbauweise mit dem U-Wert eines Hauses gleicher Dimensionen, das jedoch nur aus Strohhallen besteht, verglichen wird. Die Bohlenständerbauweise wird hierbei mit einem idealisierten Konstrukt ins Verhältnis gesetzt, das es in der Realität nicht gibt, da auch ein lasttragendes Gebäude nicht vollständig ohne Holz auskommt und zudem eine andere Wandstärke hätte.

Unter der Annahme, dass der U-Wert des Hauses in Bohlenständerbauweise⁴ $0,198 \text{ W/m}^2\text{K}$ und der U-Wert eines reinen Strohhallenhauses⁵ $0,166 \text{ W/m}^2\text{K}$ beträgt, besitzt das Strohhallenhaus in Bohlenständerbauweise einen zusätzlichen Wärmeverlust von 350 kWh/a bzw. $1,77 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$. Beim Vergleich des letzteren Wertes mit typischen Werten für den spezifischen Heizenergieverbrauch von Niedrigenergiehäusern⁶ ist festzustellen, dass der zusätzliche Wärmeverlust, den die Holzkonstruktion mit sich bringt, sehr gering ist und die Erfüllung des Niedrigenergiestandards nicht in Frage stellt. Generell muss berücksichtigt werden, dass es sich bei dieser Analyse um die Annäherung an ein Ideal handelt, welches in der Realität nicht erreicht werden kann.

4.3.4 Bewertung eines Konstruktionsdetails

Eine bewusst in Kauf genommene Wärmebrücke stellt der Erker der Villa Communia im Ökodorf Sieben Linden dar. Die Bohlenständerkonstruktion dieses Gebäudes besteht aus einer innen und einer außen stehenden Bohle mit einem dazwischen liegenden Luftspalt. Die Wärmeleitung durch die Holzkonstruktion wird dadurch vermindert. Zwischen die Bohlen sind hochkant stehende Strohhallen eingebracht worden. Der Wandaufbau besitzt einen U-Wert von $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ [20].

Im Bereich des Erkers sind konstruktionsbedingt flach liegende Strohhallen in halber Dicke $d = 25 \text{ cm}$ eingebaut worden. Dadurch verschlechtert sich der Wärmedurchgangskoeffizient der Erkerwand auf $U = 0,31 \text{ W/m}^2\text{K}$, vgl. Tab. 4.3. Das entsprechende Thermogramm dazu ist in

⁴ vgl. Gleichung 2.20 auf Seite 14

⁵ vgl. Tabelle 2.1 auf derselben Seite

⁶ Die Kategorie Niedrigenergiehaus wird üblicherweise für Wohngebäude mit einem spezifischen Heizenergieverbrauch von größer als $15 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ und kleiner als $70 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ angegeben [20].

Wärmedämmung von Strohballenhäusern

Tabelle 4.3: Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U für den Erker der Villa Communia, Ökodorf Sieben Linden

	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Wärmedurchlasswiderstand $R = d/\lambda$ [m^2K/W]
R_{si}			0,130
Lehmputz	0,03	0,800	0,038
Strohballen liegend	0,25	0,080	3,125
Kalkputz	0,03	0,870	0,034
R_{se}			0,040
R_T	0,31		3,367
$U = 1/R_T$ (ohne Holz)			0,30 W/ m^2K
U inkl. Holzkonstruktion (10%)			0,31 W/ m^2K

Abb. 5.12 in Kap. 5.4.2 dargestellt. Zwar besteht keine Gefahr der Tauwasserbildung, dennoch ist mit einem erheblichen Wärmeverlust zu rechnen.

5 Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen

5.1 Einleitung

Obwohl die theoretischen Überlegungen aus den vorangegangenen Kapiteln zeigen, dass Außenwände aus Strohballen dem Niedrigenergiestandard entsprechen, und obwohl Laborexperimente an einzelnen Strohballen und an unverputzten Strohballenwänden diese sehr guten Wärmedämmeigenschaften bestätigen [17], existieren nach wie vor Vorbehalte gegenüber dem Bauen mit Stroh.

Im Rahmen dieser Arbeit soll überprüft werden, ob es potentielle Wärmebrücken gibt, die unter Laborbedingungen nicht auftraten oder die bei den theoretischen Überlegungen vernachlässigt worden sind. Holzständerbauweisen mit durchgehenden Bohlenständern stellen zwar eine potentielle Wärmebrücke dar. Aufgrund der theoretischen Überlegungen ist jedoch davon auszugehen, dass diese Wärmebrücken schadenfrei bleiben. Durchdringungen, z. B. für Balkone, sind als potentielle Wärmebrücken an einigen Strohballenhäusern bewusst in Kauf genommen worden. Hier soll überprüft werden, welchen Einfluss diese Wärmebrücken haben und ob sie ggf. zu einem zu hohen Wärmeverlust oder zu Schäden aufgrund von Tauwasser- und Schimmelpilzbildung führen.

Darüber hinaus soll geklärt werden, ob beim Bau von Strohballenhäusern Wärmebrücken entstehen, die nicht allein auf den Dämmstoff Stroh zurückzuführen sind, sondern die von der Art der Ausführung beim Komprimieren, beim Stopfen, bei der Luftdichtung oder beim Feuchteschutz abhängig sind. Da der Dämmstoff Stroh in Form von Ballen und nicht wie andere Naturdämmstoffe in Form von Matten oder Flocken eingesetzt wird, ergeben sich bei der Verarbeitung andere Anforderungen. Für StrohballenbauerInnen gibt es (noch) keine einheitlichen Verarbeitungsrichtlinien dafür, wie beispielsweise luftdichte Anschlüsse oder ein ausreichender Feuchteschutz realisiert werden sollten. Nach dem Aufschichten der Strohballen ist das Ausstopfen der Fugen

und Löcher mit losem Stroh meistens sehr zeit- und arbeitsintensiv. Auch gibt es im Giebelbereich nicht immer Lösungen, bei denen die Ballen ausreichend komprimiert werden können und dennoch in ihrer Dreieck- oder Trapezform erhalten bleiben.

Es bleibt zu untersuchen, ob die bisherigen Lösungen für das Komprimieren, das Stopfen, die Luftdichtung und den Feuchteschutz aus wärmetechnischer Sicht zufriedenstellend sind. Darüber hinaus ist für ArchitektInnen und StrohballenbauerInnen von Interesse, in welchem Verhältnis der Zeit- und Arbeitsaufwand für diese Lösungen zur lückenlos ausgeführten Wärmedämmung steht, insbesondere ob der hohe Aufwand für das Komprimieren und das Stopfen aus wärmetechnischer Sicht gerechtfertigt ist.

5.2 Vorbemerkung zu den Thermogrammen

5.2.1 Temperaturskala

Die im folgenden Kapitel diskutierten Thermogramme sind mit unterschiedlichen Temperaturskalen dargestellt. Gleiche Farben in verschiedenen Thermogrammen bedeuten demnach nicht gleiche Temperaturen. Allgemein werden mit den roten bis weißen Flächen hohe Oberflächentemperaturen und mit den blauen bis schwarzen Flächen niedrige Oberflächentemperaturen dargestellt. Die jeweilige Temperaturskala eines Thermogrammes wurde individuell entsprechend der vorherrschenden Lufttemperatur ausgewählt.

5.2.2 Witterungseinflüsse

Die Witterungsbedingungen waren zum Zeitpunkt der Messungen an allen Standorten unterschiedlich. Optimale Bedingungen wie eine Differenz von 20 K zwischen Innen- und Außenlufttemperatur, Windstille und ein bedeckter Himmel waren nicht immer gegeben. Insbesondere bei den Thermografien bei klarem Himmel ist eine Bestimmung von absoluten Oberflächentemperaturen nicht möglich. Deshalb werden im Folgenden bei Außenthermografien lediglich die Temperaturdifferenzen innerhalb eines Thermogramms betrachtet. Bei Innenthermografien wird davon ausgegangen, dass sie die korrekten Oberflächentemperaturen wiedergeben.

5.3 Wandaufbauten im Thermogramm

5.3.1 Bohlenständerbauweise

Mittelherwigsdorf

In Abb. 5.1 ist ein Einfamilienhaus in Bohlenständerbauweise in Mittelherwigsdorf bei Zittau dargestellt. Das Bohlenständerwerk hebt sich eindeutig von den Strohballen als Flächen mit einer höheren Oberflächentemperatur ab. Die Temperaturdifferenz zwischen diesen beiden Bereichen von $0,4K$ bestätigt allerdings, dass es sich bei der Bohlenständerkonstruktion um eine unkritische Wärmebrücke handelt. Dies ist insbesondere deshalb bemerkenswert, da für dieses Haus Strohballen mit einer ungewöhnlich kleinen Breite von nur 30 cm eingesetzt worden sind. Der rechnerische Nachweis der Schadenfreiheit dieser Wärmebrücke wurde bereits in Kap. 2.2.5 auf Seite 11 ausführlich dargelegt.

Der Sockel stellt keine Wärmebrücke dar, lediglich an den Befestigungsstellen ist die Temperatur punktförmig geringfügig erhöht. Auch die Fensterrahmen weisen mit einer Oberflächentemperaturdifferenz von weniger als $2,0K$ gute Wärmedämmeigenschaften auf. Eine große Schwachstelle stellt das Ende des Entlüftungsrohres in der Mitte der Fassade mit einer deutlich höheren Temperaturdifferenz dar. Dieser Energieverlust ließe sich durch eine Dämmung des Rohres minimieren.

Auffällig ist außerdem der Giebelbereich mit einer Temperaturdifferenz von bis zu $1,0K$ gegenüber dem ungestörten Wandbereich. Offensichtlich sind die Strohballen in der obersten Reihe nicht mehr ausreichend komprimiert und die Fugen nicht sorgfältig genug gestopft worden. Auf dieses Problem ist bereits in Kap. 5.1 eingegangen worden. Das Thermogramm bestätigt die Gefahr der nicht vollflächig ausgeführten Wärmedämmung, wenn das Komprimieren und Stopfen der obersten Ballenreihe nicht mit ausreichender Sorgfalt ausgeführt wird. Im Bereich der Balkendurchführungen ist die Temperaturdifferenz höher als im restlichen Giebelbereich, da die Balken geringfügige materialbedingte Wärmebrücken darstellen.

Wunstorf

Das Strohballenhaus, dessen Thermogramm in Abb. 5.2 dargestellt ist, steht in Wunstorf bei Hannover. Für dieses Haus in Bohlenständerbauweise wurden Ballen mit einer normalen Breite von 35 cm verwendet. Diese sind allerdings beim Einbau weniger als üblich komprimiert worden.

Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen

In dieser Außenaufnahme sind zusätzlich zu den vertikalen Linien im Bereich der Bohlenständer auch horizontale Linien in den Bereichen, in denen zwei Ballen aufeinander aufliegen – also das vollständige Fugenbild – sichtbar. Der Grund dafür ist die geringe Kompression der Strohballen beim Einbau. Die Temperaturdifferenz zwischen dem Bereich eines Strohballens und dem Bereich eines Fugenknotenpunktes ist mit $0,2-0,3\text{ K}$ sehr gering. Der Sockel des Gebäudes mit einer Oberflächentemperaturdifferenz von weniger als $1,0\text{ K}$ sowie die Fensterrahmen mit einer Oberflächentemperaturdifferenz von etwa $2,0\text{ K}$ stellen keine schadhaften Wärmebrücken an diesem Gebäude dar.

Windrose

Das Wohnhaus Windrose im Ökodorf Sieben Linden, dessen Thermogramm in Abb. 5.3 dargestellt ist, befand sich zum Zeitpunkt der Messung noch in der Bauphase und der Unterputz in der Trocknungsphase. Aus diesem Grund soll auf die Oberflächentemperaturen an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Bei dieser Konstruktion handelt es sich um eine Bohlenständerbauweise, bei der die Bohlenständer teilweise mit 2 cm Weichfaser überdämmt worden sind. Zwischen den Bohlenständern, die im Abstand von 1 m stehen, sind jeweils zwei hochkant stehende Strohballen eingebracht worden.

Bemerkenswert an der Thermografie in Abb. 5.3 ist, dass im Abstand von ca. 50 cm vertikale Linien mit einer höheren Oberflächentemperatur sichtbar sind, wobei zunächst nicht unterschieden werden kann, ob es sich hierbei um Bereiche mit Bohlenständern oder um Bereiche mit reinen Ballenstoßkanten handelt. Ein Grund dafür ist, dass die Strohballen beim Einbau weniger als üblich komprimiert worden sind. Ohne dass eine quantitative Aussage über die genauen Oberflächentemperaturen möglich ist, ist dennoch festzustellen, dass die Bohlenständer eine weitaus geringere Wärmebrücke darstellen, als angenommen. Die Ursache dafür sind Wärmetransportvorgänge innerhalb der Strohballenwand, die sowohl im Grenzbereich zwischen Bohlenständer und Strohballen als auch im Grenzbereich zwischen zwei Strohballen stattfinden, vgl. Abb. 2.3 auf Seite 13.

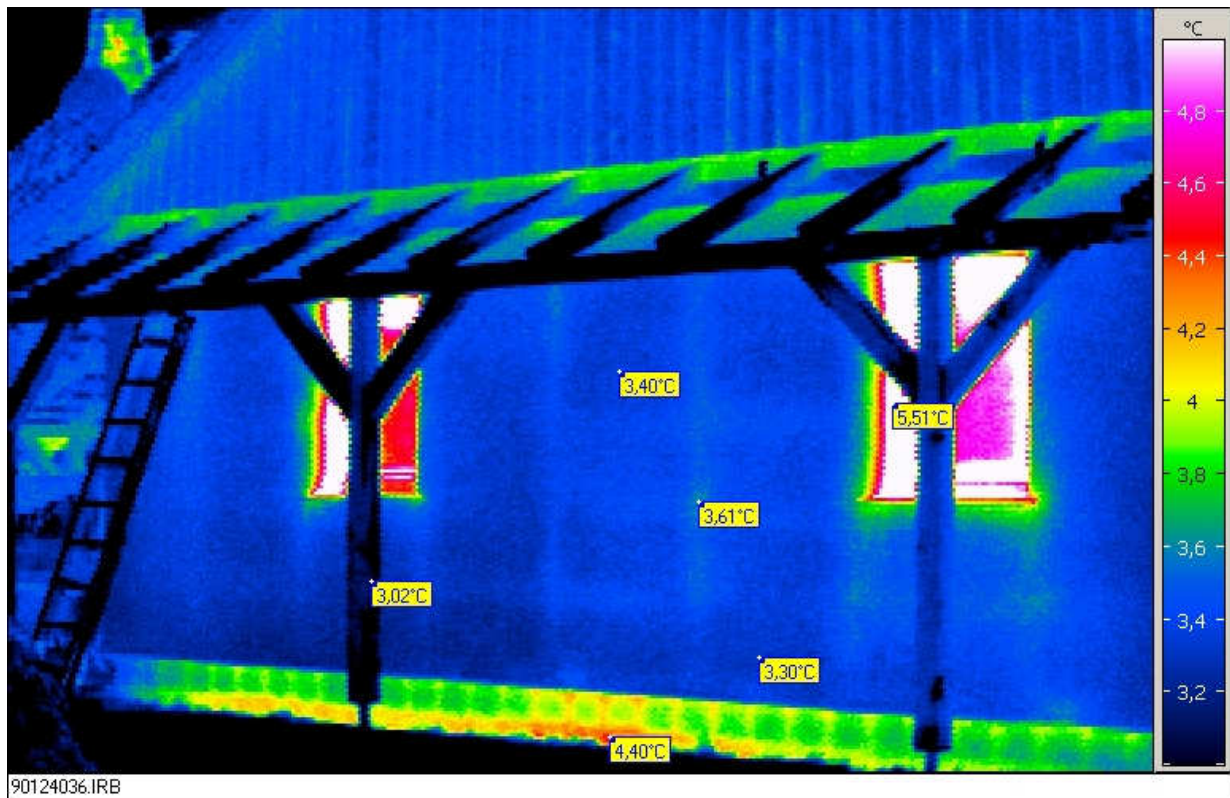
Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen



Aufnahmedatum	02. 03. 2009
Aufnahmeuhrzeit	früh
Außenlufttemperatur	3 °C
Innenlufttemperatur	22 °C
Bedeckung	100 %
Windgeschwindigkeit	<2 m/s
Emissionsgrad	0,92

Abbildung 5.1: Außenthermografie der Ostansicht des Einfamilienhauses in Bohlenständerbauweise in Mittelherwigsdorf bei Zittau (mit Lüftungsrrohr)

Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen



Aufnahmedatum	24. 01. 2009
Aufnahmeuhrzeit	früh
Außenlufttemperatur	2 °C
Innenlufttemperatur	22 °C
Bedeckung	100 %
Windgeschwindigkeit	8 m/s
Emissionsgrad	0,92

Abbildung 5.2: Außenthermografie der Nordansicht des Einfamilienhauses in Bohlenständerbauweise in Wunstorf

Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen



Aufnahmedatum	25. 01. 2009
Aufnahmeuhrzeit	früh
Außenlufttemperatur	-3 °C
Innenlufttemperatur	ca. 16 °C
Bedeckung	0 %
Windgeschwindigkeit	<2 m/s
Emissionsgrad	0,92

Abbildung 5.3: Außenthermografie der Ostansicht des Wohnhauses Windrose in Bohlenständerbauweise

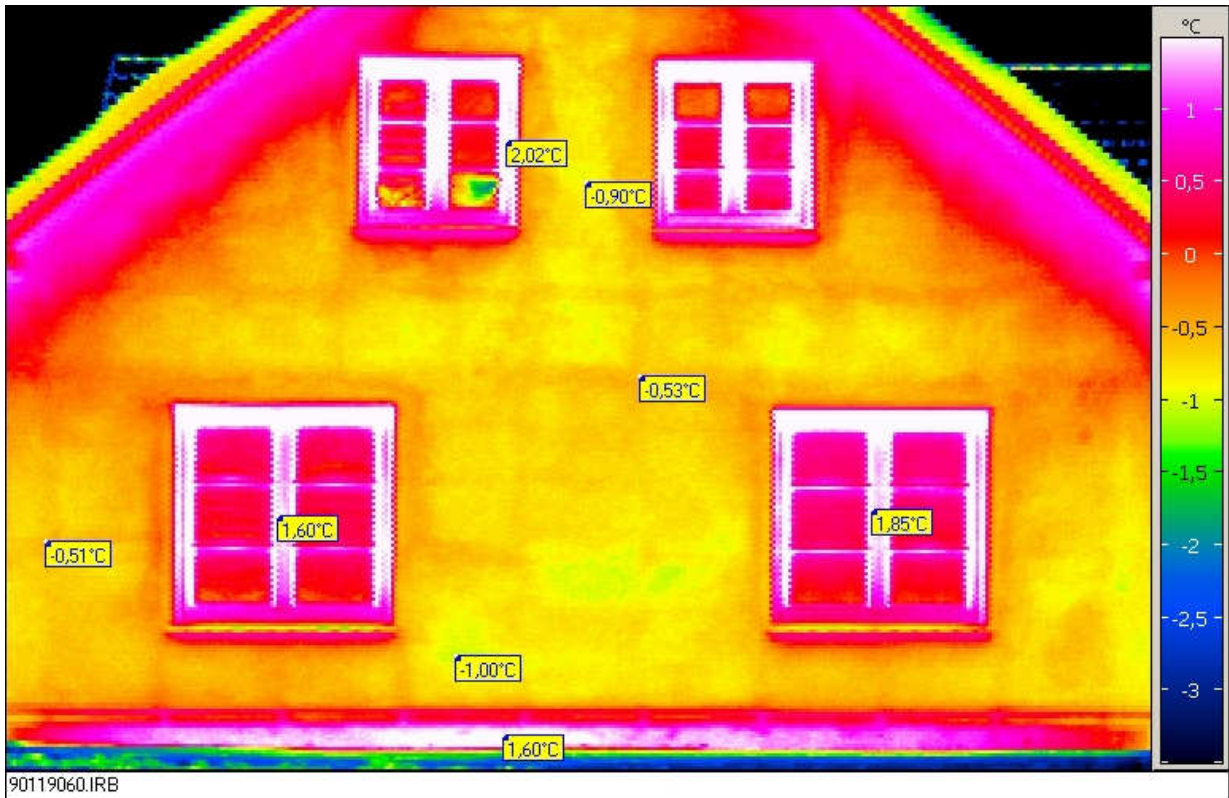
5.3.2 TJI-Trägerkonstruktion

Papendorf

In Abb. 5.4 ist ein Strohballenhaus mit TJI-Trägerkonstruktion dargestellt, das in Papendorf in Ostvorpommern steht. In dieser Außenaufnahme sind sowohl die vertikalen TJI-Träger als auch die horizontalen Ballenstoßkanten als Bereiche mit einer höheren Oberflächentemperatur sichtbar. Zusätzlich hebt sich der Ringanker oberhalb der Fenster als Fläche mit einer höheren Oberflächentemperatur ab. Die Temperaturdifferenzen zwischen dem Bereich eines Strohballens und dem Bereich des Ringankers bzw. eines TJI-Trägers betragen im Maximum $0,5\text{ K}$. Der Sockel des Gebäudes mit einer Oberflächentemperaturdifferenz von etwa $2,6\text{ K}$ sowie die Fensterrahmen mit Oberflächentemperaturdifferenzen zwischen $2,6$ und $3,0\text{ K}$ stellen ebenfalls keine schadhafte Wärmebrücken an diesem Gebäude dar.

Ergänzend dazu ist in Abb. 5.5 eine Innenaufnahme mit dem Ringanker dieses Gebäudes dargestellt. Sowohl die TJI-Träger als auch die horizontalen Ballenstoßkanten sind in dieser Thermografie nicht erkennbar. Die Oberflächentemperatur liegt im Bereich der Strohballen bei $19,8\text{ °C}$ und im Bereich des Ringankers außerhalb des Eckbereichs bei $19,4\text{ °C}$. Die Temperaturdifferenz zwischen diesen beiden Bereichen beträgt $0,4\text{ K}$. Besonders auffällig an dieser Thermografie ist die $17,1\text{ °C}$ kalte Innenecke mit einer Temperaturdifferenz von $2,7\text{ K}$ im Vergleich zum ungestörten Außenwandbereich mit $19,8\text{ °C}$. Der Grund dafür ist das Aufeinandertreffen mehrerer sich addierender Faktoren: Einerseits wirkt eine Außenwanddecke schon allein als geometrische Wärmebrücke. Andererseits stellen der durchgehende Deckenbalken sowie der massive Ringanker jeweils materialbedingte Wärmebrücken dar. Das Thermogramm zeigt anschaulich, dass diese konstruktive Lösung den Nachteil einer relativ kalten Innenecke mit sich bringt. Bei einer Inneneckentemperatur von $17,1\text{ °C}$ und einer ausreichenden Belüftung durch die Lüftungsanlage im gesamten Gebäude besteht zwar keine Gefahr der Tauwasserbildung, der Wärmeverlust wäre aber zu verhindern gewesen.

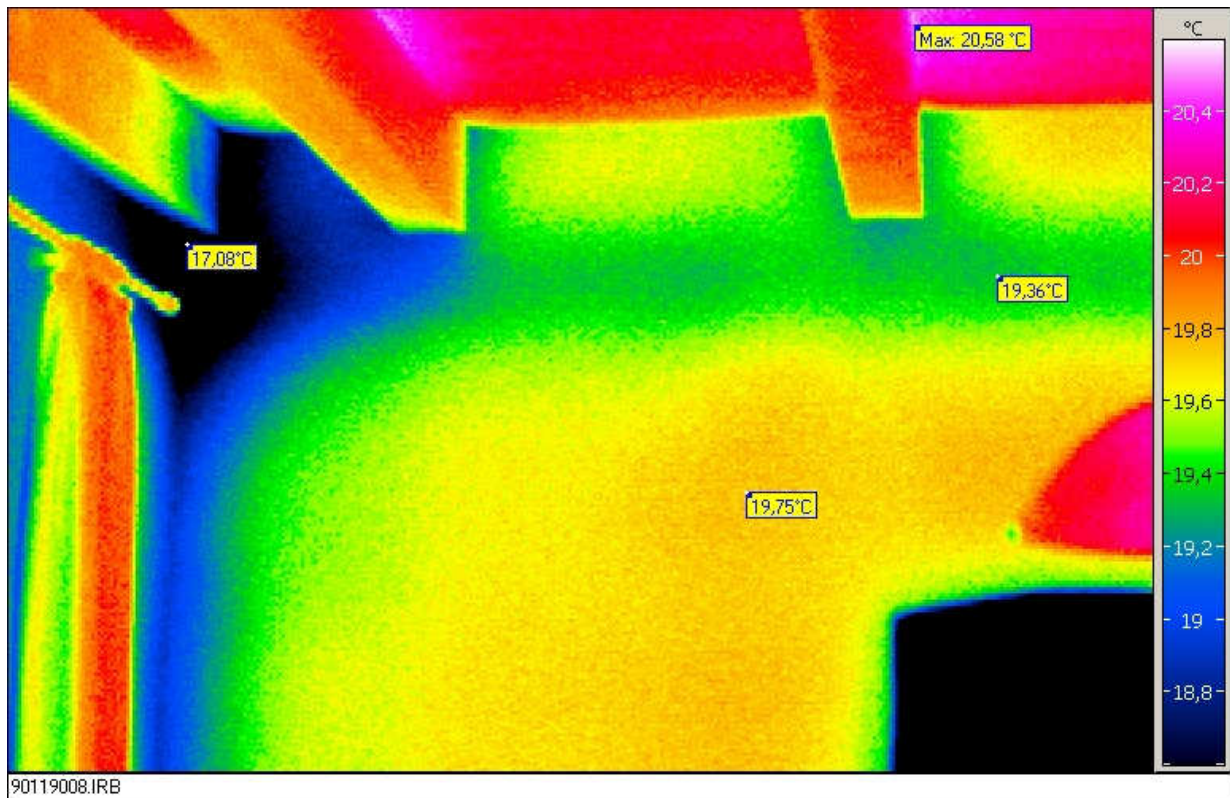
Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen



Aufnahmedatum	19. 01. 2009
Aufnahmeuhrzeit	früh
Außenlufttemperatur	0 °C
Innenlufttemperatur	20 °C
Bedeckung	0 %
Windgeschwindigkeit	<2 m/s
Emissionsgrad	0,92

Abbildung 5.4: Außenthmografie der Westansicht des Einfamilienhauses mit TJI-Trägerkonstruktion in Papendorf

Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen



Aufnahmedatum	19. 01. 2009
Aufnahmeuhrzeit	früh
Außenlufttemperatur	0 °C
Innenlufttemperatur	20 °C
Bedeckung	0 %
Windgeschwindigkeit	<2 m/s
Emissionsgrad	0,92

Abbildung 5.5: Innenthermografie einer Zimmerecke des Einfamilienhauses in Papendorf mit TJI-Trägerkonstruktion und Ringanker

5.3.3 Bauweisen mit innen stehenden Holzständern

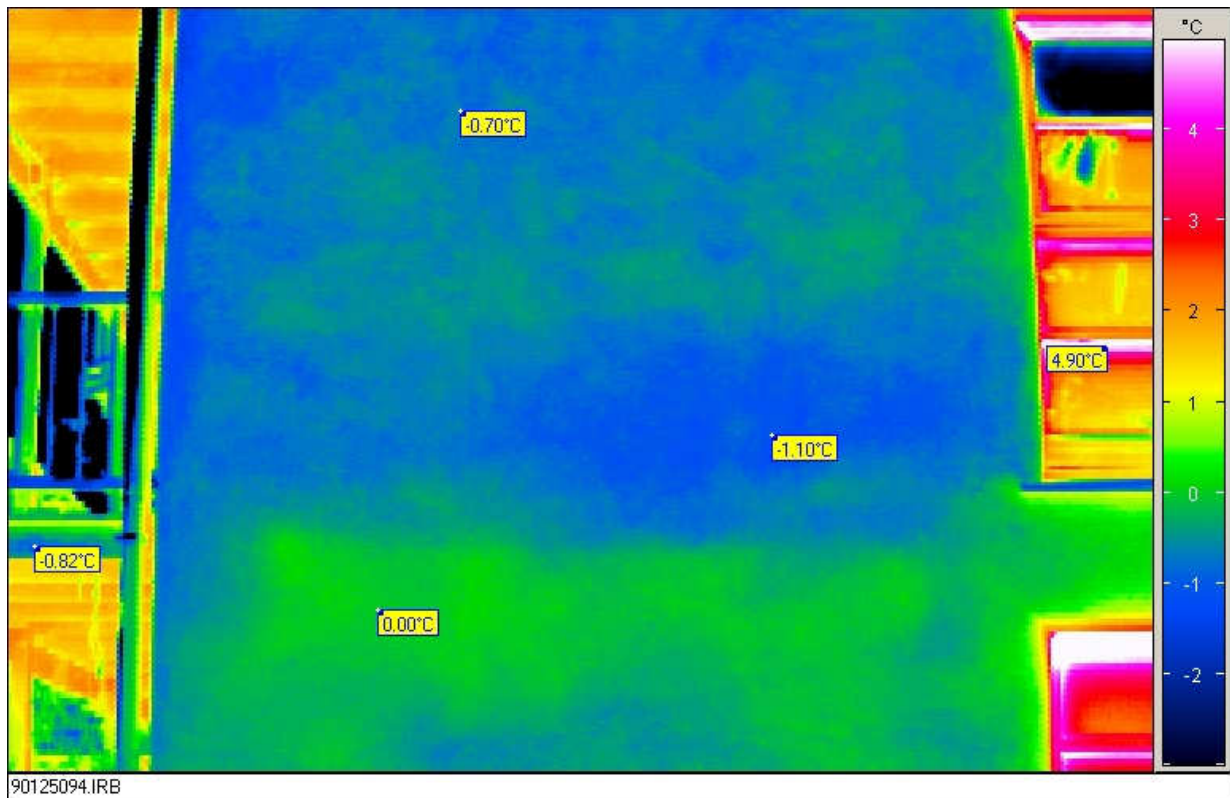
Strohpolis

In Abb. 5.6 ist die Außenthermografie des Wohnhauses Strohpolis im Ökodorf Sieben Linden dargestellt. Die innen in der Strohballenwand stehenden Holzständer sind im Thermogramm nicht sichtbar. Da die Strohballen beim Einbau sehr stark komprimiert wurden, sind ebenfalls keine horizontalen und vertikalen Ballenstoßkanten erkennbar. Die Oberflächentemperatur der Außenwand ist weitgehend homogen verteilt. Sie ist jedoch im Bereich der ersten Etage um $1,0\text{ K}$ niedriger als im Bereich des Erdgeschosses. Der Grund dafür ist der stärkere Strahlungsaustausch mit der Umgebung, vgl. Kap. 3.3.1 auf Seite 25, da der Himmel wolkenlos war.

Villa Strohbund

Einen ähnlichen Sachverhalt zeigt die Thermografie der Villa Strohbund, ebenfalls im Ökodorf Sieben Linden, die in Abb. 5.7 dargestellt ist. Die Holzständer stehen innen vor der Strohballenwand und haben somit keinen Einfluss auf die Wärmedämmeigenschaften der Wand. Da für die Villa Strohbund flach liegende Strohballen mit einer Dicke von 45 cm zum Einsatz kamen, sind ebenfalls keine horizontalen oder vertikalen Ballenstoßkanten im Thermogramm sichtbar. Die Oberflächentemperatur ist homogen verteilt. Da die Thermografie-Messung bei sternklarem Himmel durchgeführt wurde, ist das Messergebnis stark durch den Strahlungsaustausch mit der Umgebung beeinflusst. Deshalb liegt die Oberflächentemperatur an der Westseite um $3\text{--}4\text{ K}$ niedriger als an der – durch ein Vordach geschützten – Nordseite, vgl. Kap. 3.3.1 auf Seite 25.

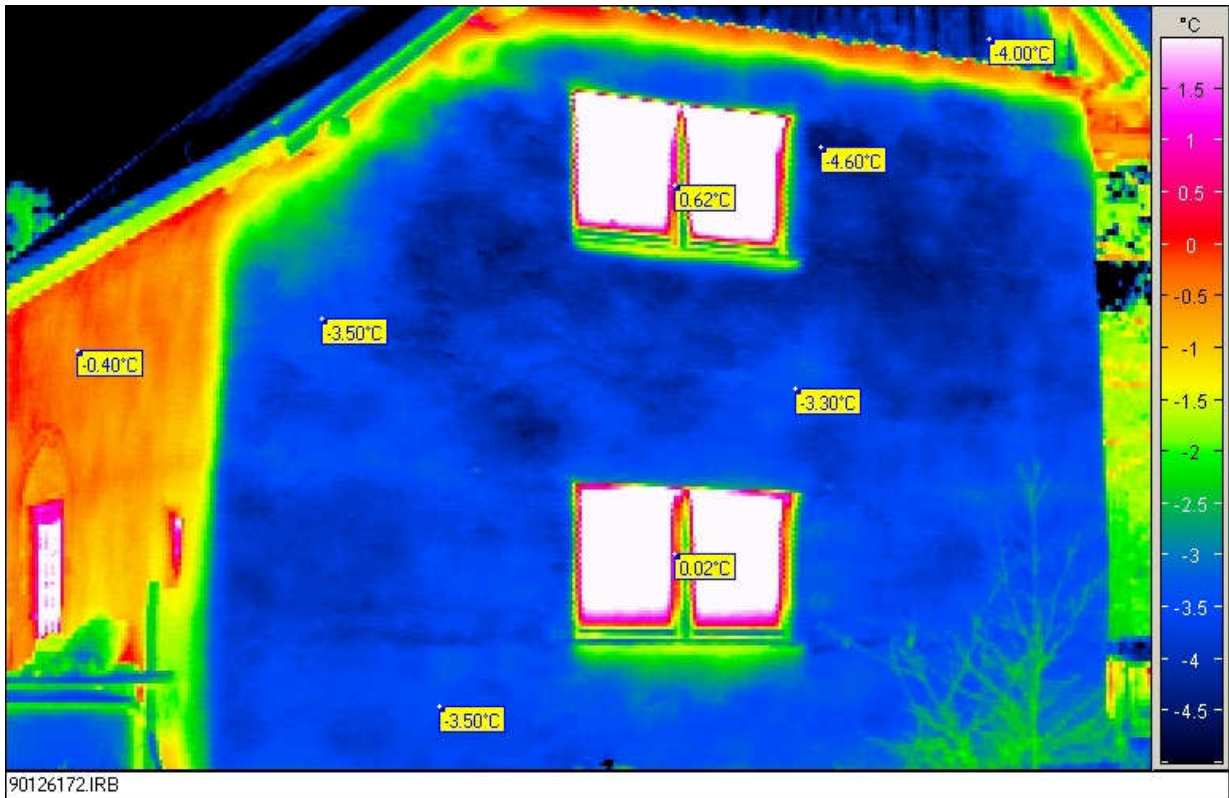
Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen



Aufnahmedatum	25. 01. 2009
Aufnahmeuhrzeit	früh
Außenlufttemperatur	0 °C
Innenlufttemperatur	19 °C
Bedeckung	0 %
Windgeschwindigkeit	<2 m/s
Emissionsgrad	0,92

Abbildung 5.6: Außenthmografie der Ostansicht des Wohnhauses Strohpolis mit innen stehenden Holzständern

Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen



Aufnahmedatum	26. 01. 2009
Aufnahmeuhrzeit	nachts
Außenlufttemperatur	-3 °C
Innenlufttemperatur	ca. 20 °C
Bedeckung	0 %
Windgeschwindigkeit	<2 m/s
Emissionsgrad	0,92

Abbildung 5.7: Außenthermografie der Westansicht der Villa Strohbund mit innen stehenden Holzständern

5.3.4 Lasttragende Bauweise

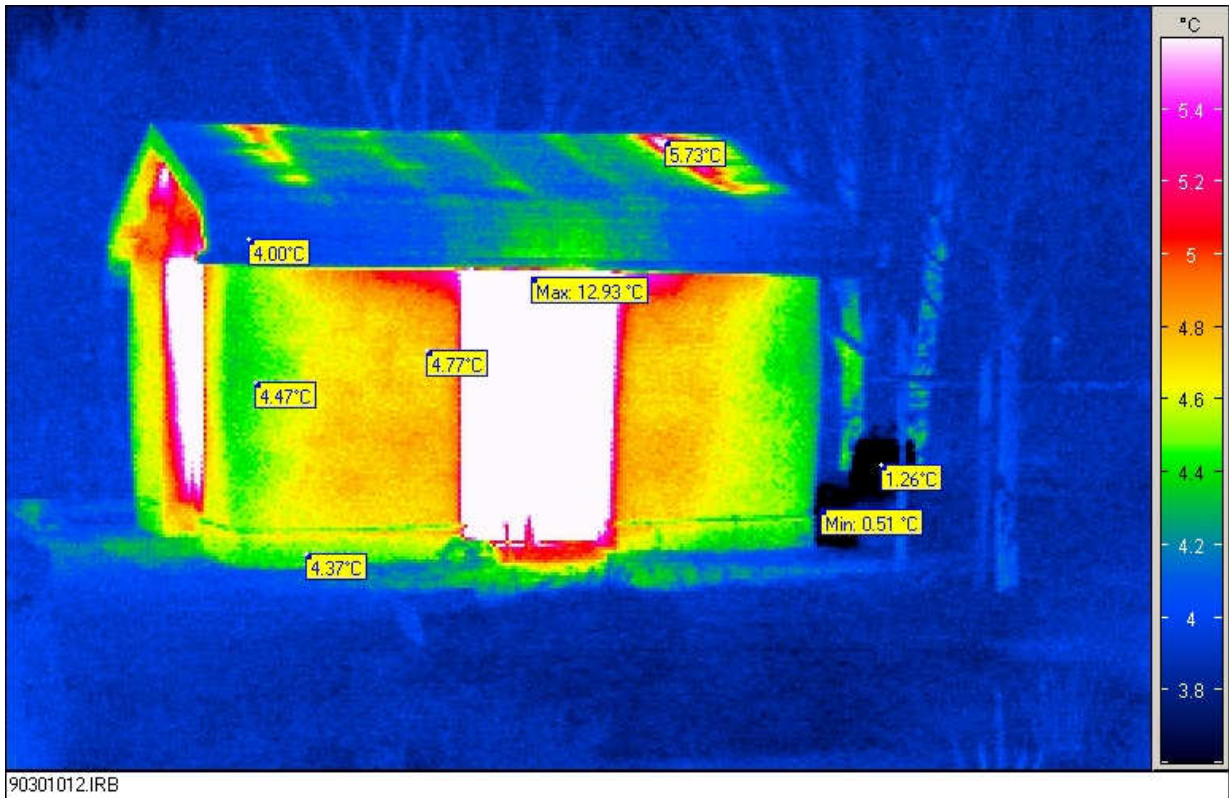
Berlin-Mariendorf

In Abb. 5.8 ist die Außenthermografie einer lasttragenden Konstruktion dargestellt. Dieses Gebäude in Berlin-Mariendorf wird in der Regel nicht beheizt und nur in den Sommermonaten als Gartenlaube genutzt. Es wurde im Vorfeld der Thermografie-Messung mit einem Ölradiator beheizt. Obwohl die Differenz zwischen Innen- und Außenlufttemperatur mit 12 K sehr gering ist, sind die thermischen Schwachstellen eindeutig lokalisierbar. Dennoch wird im Folgenden auf eine Bewertung des Daches und des oberen Türbereiches verzichtet, da es sich um ein nur unbeheizt genutztes Gebäude handelt.

Ein interessantes Detail stellen die beiden Regenwassertonnen im rechten Bildbereich dar. Zum Zeitpunkt der Messung waren die Tonnen mit Eiswasser gefüllt, das heißt, dass die Lufttemperatur in den Stunden vor der Messung unterhalb des Gefrierpunktes gelegen haben muss. Das Eiswasser mit einer Temperatur von 0 °C eignet sich sehr gut als Referenzwert für die Temperaturmessung und gibt Aufschluss über die Qualität der Messmethode. In Kap. 3.3.3 auf Seite 26 ist der Rechenweg zur Bestimmung der Temperatur an der Außenseite der Regenwassertonne dargestellt. Der rechnerisch ermittelte Wert von $0,9\text{ °C}$ stimmt gut mit den mit Hilfe der Thermografie bestimmten Messwerten von $0,5\text{--}1,3\text{ °C}$ überein. Daraus folgt, dass das Thermogramm, das in Abb. 5.8 dargestellt ist, die Oberflächentemperaturen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,4\text{ K}$ wiedergibt.

Zum Wandaufbau ist festzustellen, dass das Fugenbild – bestehend aus horizontalen und vertikalen Ballenstoßkanten – nicht erkennbar ist. Die Gebäudeecken zeichnen sich eindeutig als geometrische Wärmebrücken ab. Während die Oberflächentemperatur im ungestörten Wandbereich $4,8\text{ °C}$ beträgt, liegt sie im Bereich der Gebäudeecken bei nur $4,4\text{ °C}$. Die Temperaturdifferenz zwischen diesen beiden Bereichen ist mit $0,4\text{ K}$ als gering einzustufen. Über den Sockel des Gebäudes kann anhand der Außenthermografie keine Aussage getroffen werden, da er hinterlüftet ist.

Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen



Aufnahmedatum	01. 03. 2009
Aufnahmeuhrzeit	früh
Außenlufttemperatur	4 °C
Innenlufttemperatur	16 °C
Bedeckung	100 %
Windgeschwindigkeit	<2 m/s
Emissionsgrad	0,92

Abbildung 5.8: Außenthermografie der Gartenlaube in lasttragender Bauweise in Berlin (Mariendorf)

5.4 Konstruktionsdetails im Thermogramm

5.4.1 Balkendurchführungen

Strohpolis

In Abb. 5.9 ist die Außenthermografie der Balkons in der ersten Etage an der Südseite von Strohpolis dargestellt. An der Unterseite der Balkons liegt die Oberflächentemperatur um etwa $1,1\text{ K}$ höher als im ungestörten Außenwandbereich. An dieser Stelle ist wissentlich in Kauf genommen worden, dass die Holzbalken ohne thermische Trennung durch die Fassade geführt werden. Anhand des Thermogramms wird deutlich, dass diese Wärmebrücke als vernachlässigbar einzustufen ist, da die Temperaturdifferenz sehr gering ist.

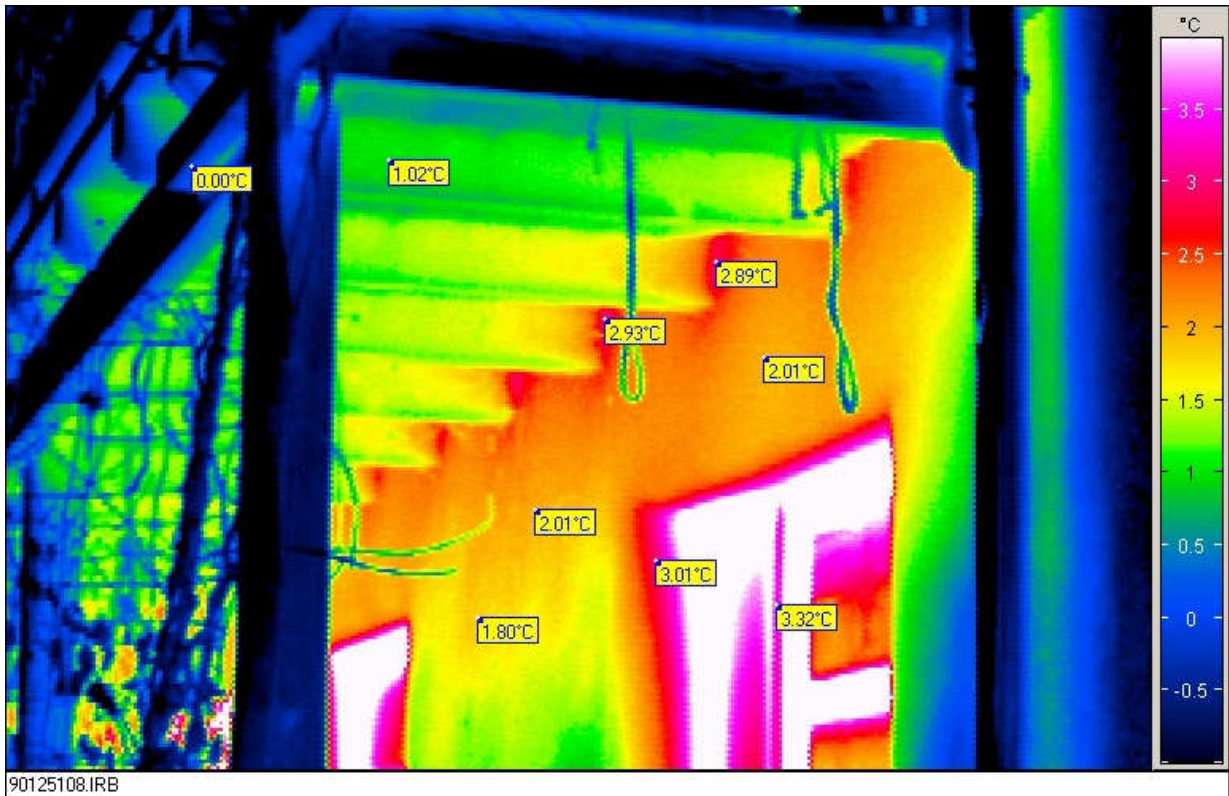
Villa Strohbund

Anders verhält es sich in der Thermografie der Südseite der Villa Strohbund. In Abb. 5.10 ist die Wärmebrückenwirkung im Bereich der Balkendurchführung anschaulich gezeigt. Die Oberflächentemperaturdifferenz von $6,5\text{ K}$ zwischen dem Durchstoßungsbereich und dem ungestörten Wandbereich ist nicht mehr zu vernachlässigen. Da es sich bei diesem Gebäude allerdings um den einzigen Balken mit einer Wärmebrücke dieses Ausmaßes handelt, kann davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei nicht um eine fehlerhafte Konstruktion handelt, sondern dass bei der Ausführung des Balkenanschlusses an dieser Stelle weniger akkurat gearbeitet worden ist als an den anderen Balkendurchführungen.

Haus auf der Brunnenwiese

Ein ähnliches Ergebnis liefert die Innenthermografie im Wohnbereich des Hauses auf der Brunnenwiese, ebenfalls im Ökodorf Sieben Linden. Dieses Haus mit mittig stehenden Holzständern wurde im Erdgeschoss mit Hanf und im Obergeschoss mit Strohballen gedämmt. Ein einziger Deckenbalken im Erdgeschoss weist eine ungenügend gedämmte Balkendurchführung auf, wie Abb. 5.11 zeigt. Die minimale Inneneckentemperatur beträgt $14,1\text{ °C}$, wobei die Oberflächentemperatur im ungestörten Wandbereich bei etwa $20,0\text{ °C}$ liegt, d. h. die Temperaturdifferenz beträgt knapp 6 K . Unklar ist, was die Ursache für die Undichtigkeit bzw. die Unterbrechung der Wärmedämmebene ist.

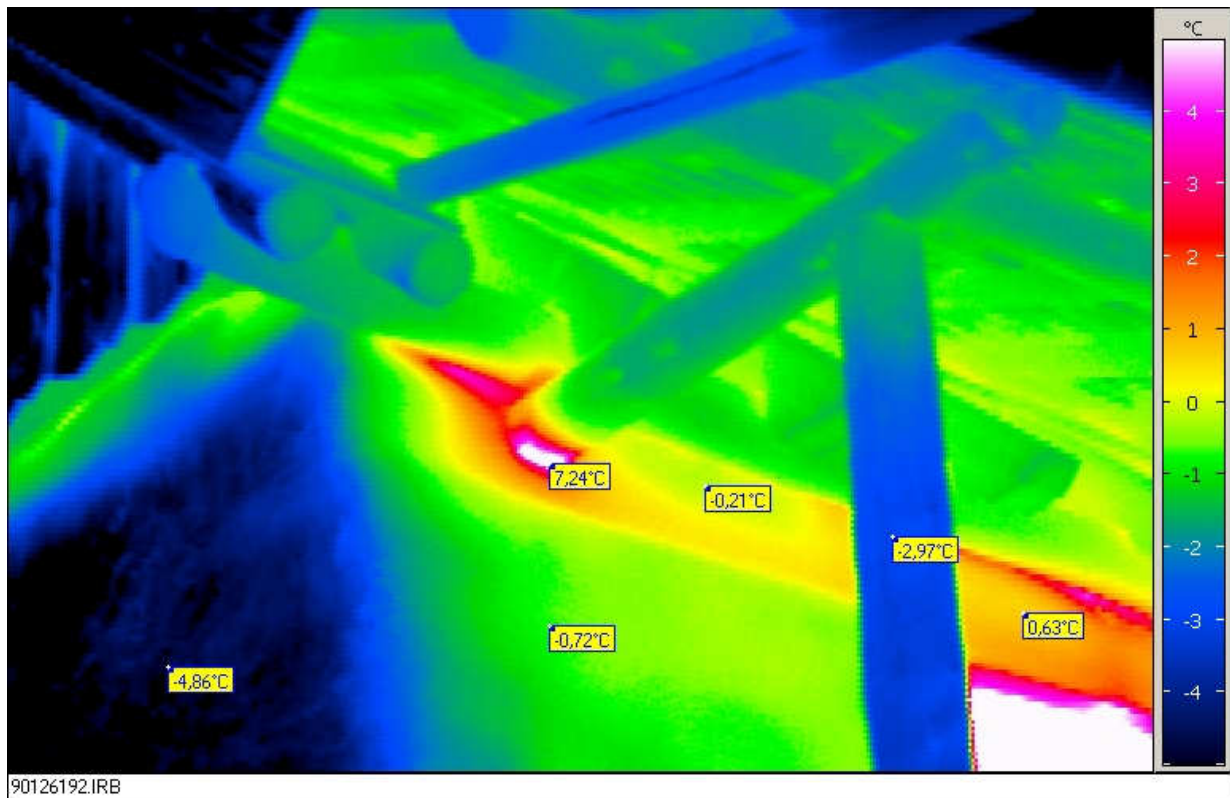
Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen



Aufnahmedatum	25. 01. 2009
Aufnahmeuhrzeit	früh
Außenlufttemperatur	0 °C
Innenlufttemperatur	19 °C
Bedeckung	0 %
Windgeschwindigkeit	<2 m/s
Emissionsgrad	0,92

Abbildung 5.9: Außenthermografie der Südansicht des Wohnhauses Strohpolis mit durchgehenden Balken

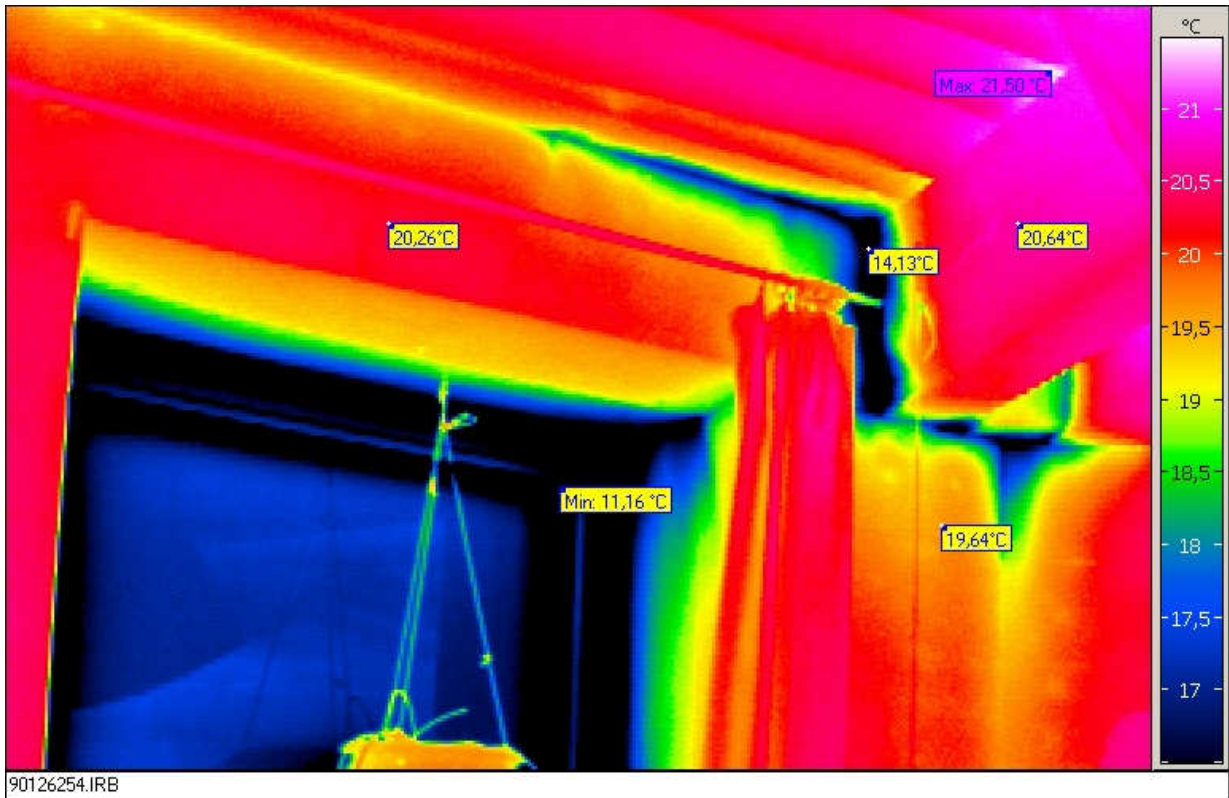
Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen



Aufnahmedatum	26. 01. 2009
Aufnahmeuhrzeit	nachts
Außenlufttemperatur	-3 °C
Innenlufttemperatur	ca. 20 °C
Bedeckung	0 %
Windgeschwindigkeit	<2 m/s
Emissionsgrad	0,92

Abbildung 5.10: Außenthermografie der Südansicht der Villa Strohbund mit einem von innen nach außen durchgehenden Holzbalken

Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen



Aufnahmedatum	26. 01. 2009
Aufnahmeuhrzeit	früh
Außenlufttemperatur	-1 °C
Innenlufttemperatur	19 °C
Bedeckung	100 %
Windgeschwindigkeit	<2 m/s
Emissionsgrad	0,92

Abbildung 5.11: Innenthermografie des Wohnbereichs im Haus auf der Brunnenwiese mit ungenügend gedämmter Balkendurchführung

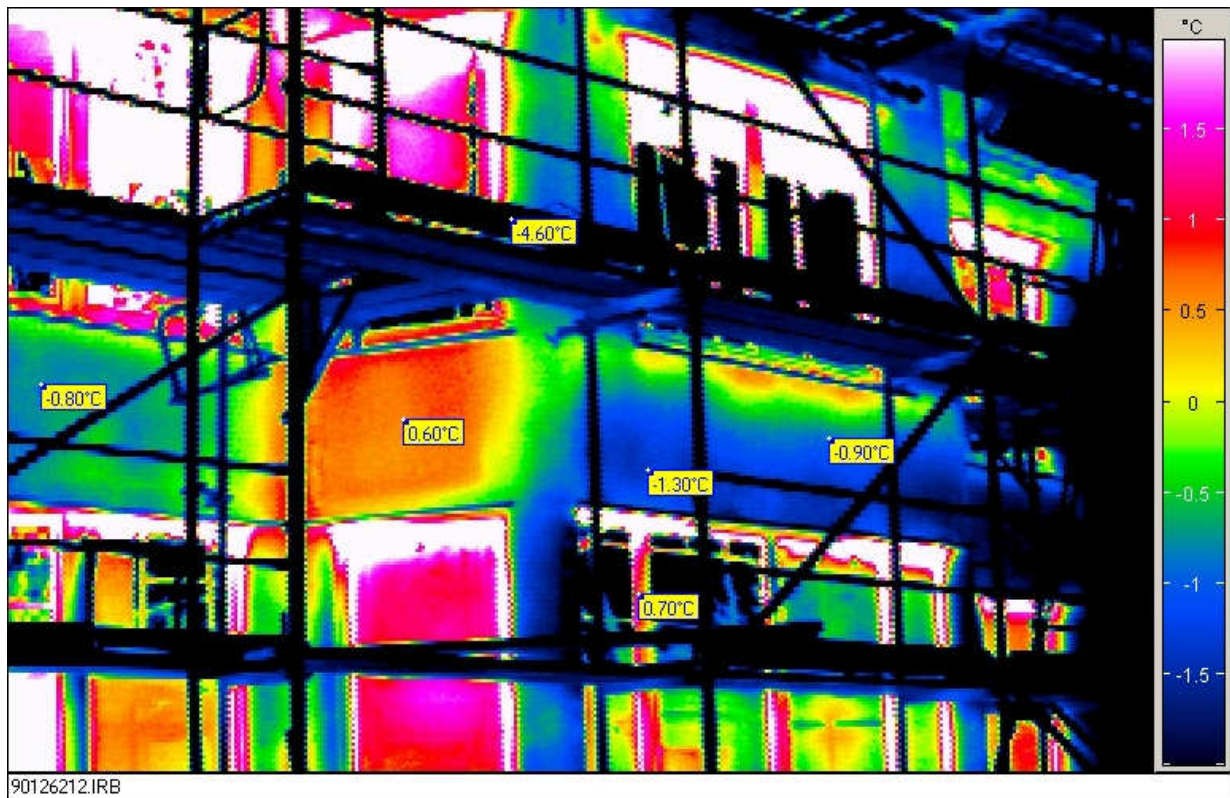
5.4.2 Erker

Villa Communia

In Abb. 5.12 ist die Außenaufnahme des Erkers der Villa Communia im Ökodorf Sieben Linden dargestellt. Die Bohlenständerkonstruktion dieses Gebäudes besteht aus einer innen und einer außen stehenden Bohle mit einem dazwischen liegenden Luftspalt. Zwischen die Bohlen sind hochkant stehende Strohballen eingebracht worden. Nur im Bereich des Erkers sind flach liegende Strohballen in halber Dicke $d = 25\text{ cm}$ zum Einsatz gekommen. Diese Stelle ist im Thermogramm eindeutig lokalisierbar. Die Differenz der Oberflächentemperaturen beträgt $1,4\text{ K}$.

Der Einfluss dieser bewusst in Kauf genommenen Wärmebrücke auf den U-Wert der Wandkonstruktion ist bereits in Kap. 4.3.4 auf Seite 37 diskutiert worden. Zwar besteht keine Gefahr der Tauwasserbildung, dennoch ist mit einem Wärmeverlust zu rechnen.

Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen



Aufnahmedatum	26. 01. 2009
Aufnahmeuhrzeit	nachts
Außenlufttemperatur	-4 °C
Innenlufttemperatur	16 °C
Bedeckung	0 %
Windgeschwindigkeit	<2 m/s
Emissionsgrad	0,92

Abbildung 5.12: Außenthermografie des Erkers der Villa Communia mit in halber Dicke eingebauten Strohballen

5.5 Auswertung

Die in diesem Kapitel diskutierten Thermogramme bestätigen die theoretischen Erkenntnisse über die wärmedämmenden Eigenschaften der Wandkonstruktionen von Strohballenhäusern. Bohlenständer- und TJI-Trägerkonstruktionen sind zwar als Wärmebrücken im Thermogramm sichtbar. Sie sind jedoch als schadenfrei einzustufen, da die Temperaturdifferenz zwischen dem Bereich der Holzkonstruktion und dem Bereich der Strohballen nie größer als $0,5 K$ ist. Lasttragende Konstruktionen und Konstruktionen mit innen stehenden Holzständern weisen vollständig homogen verteilte Oberflächentemperaturen auf und sind somit aus wärmetechnischer Sicht uneingeschränkt empfehlenswert.

Im Gegensatz zu den Berechnungen in Kap. 4.3.1, bei denen sich die U-Werte der Strohballenwände mit stehenden bzw. liegenden Strohballen nicht voneinander unterscheiden, zeigen die Thermogramme, dass sich bei allen Häusern mit hochkant oder aufrecht stehend eingebauten Strohballen keine homogen verteilte Oberflächentemperatur einstellt, bei den Häusern mit flach liegend eingebauten Strohballen hingegen schon, da keine durchgehenden Holzelemente vorhanden sind.

Zusätzlich zu den Holzkonstruktionen sind in einigen Thermogrammen auch die horizontalen bzw. vertikalen Ballenstoßkanten sichtbar. Offensichtlich steht die Sichtbarkeit dieses Fugenbildes in einem starken Zusammenhang mit der Sorgfalt beim Komprimieren und Stopfen einerseits und mit der Wanddicke andererseits:

1. In Wunstorf (Abb. 5.2) und bei der Windrose (Abb. 5.3) sind die Strohballen verhältnismäßig wenig komprimiert worden. In diesen Thermogrammen ist das Fugenbild sehr deutlich erkennbar.
2. In Mittelherwigsdorf (Abb. 5.1), ist durch die Schwierigkeit, dreieckige Strohballen für den Giebelbereich ausreichend zu komprimieren und die Löcher in der Giebelwand sorgfältig zu stopfen, eine Wärmebrücke beim Anschluss an das Dach entstanden.
3. Bei Wandkonstruktionen mit Ballen ab einer Dicke von 45 cm – bei Strohpolis (Abb. 5.6), bei der Villa Strohbund (Abb. 5.7) und in Berlin-Mariendorf (Abb. 5.8) – ist im Thermogramm kein Fugenbild erkennbar.

Aus wärmetechnischer Sicht ist es demnach sinnvoll, große Sorgfalt in das Komprimieren und das Stopfen der Strohballenwände zu investieren. Außerdem sollte auf durchgehende Holzelemente möglichst verzichtet werden.

Diskussion und Auswertung der Thermografie-Aufnahmen

Bei der Untersuchung der Konstruktionsdetails ist festzustellen, dass Durchdringungen nicht grundsätzlich eine kritische Wärmebrücke darstellen. Wird der luftdichte Anschluss sorgfältig ausgeführt und fällt die materialbedingte Wärmebrücke – die die Durchdringung darstellt – nicht in den Bereich einer geometrischen Wärmebrücke, so ist mit einer Temperaturdifferenz von weniger als $1,5\text{ K}$ zu rechnen. Als Beispiel hierfür ist der Balkon von Strohpolis (Abb. 5.9) zu nennen. Auch in Papendorf, bei der Villa Strohbund und beim Haus auf der Brunnenwiese sind die meisten Durchdringungen im Thermogramm völlig unauffällig. Die in dieser Arbeit diskutierten Thermogramme zeigen die Ausnahmen. In Papendorf (Abb. 5.5) liegt die Ursache in der Konstruktion, allerdings ist hier die Temperaturdifferenz mit $2,7\text{ K}$ noch verhältnismäßig gering. Bei der Villa Strohbund (Abb. 5.10) und beim Haus auf der Brunnenwiese (Abb. 5.11) ist davon auszugehen, dass die luftdichten Anschlüsse nicht sorgfältig genug ausgeführt worden sind, das heißt, dass es sich um Verarbeitungsfehler handelt. An den undichten Stellen durchströmt die warme Innenluft die Konstruktion und tritt an der Außenseite aus (Abb. 5.10) bzw. es dringt kalte Luft von außen nach innen ein (Abb. 5.11). Um zu bestätigen, dass es sich in beiden Fällen um Lecks in der Luftdichtigkeit handelt, wäre eine Nachfolgeuntersuchung mit Hilfe eines Blower-Door-Tests sinnvoll.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, ob beim Bau von Strohballenhäusern Wärmebrücken entstehen, die nicht allein auf den Dämmstoff Stroh zurückzuführen sind, sondern die von der Art der Ausführung beim Komprimieren, beim Stopfen, bei der Luftdichtung oder beim Feuchteschutz abhängig sind. Darüber hinaus wurde überprüft, ob es potentielle Wärmebrücken gibt, die unter Laborbedingungen nicht auftraten oder die bei den bisherigen theoretischen Überlegungen vernachlässigt wurden.

Mit Hilfe der Thermografie konnte gezeigt werden, dass alle untersuchten Wandkonstruktionen von Strohballenhäusern sehr gute Wärmedämmeigenschaften aufweisen. Die Konstruktionen mit innen stehenden Holzständern und die lasttragende Bauweise zeigen dabei etwas homogenere Temperaturverteilungen als die Bohlenständerbauweise und die TJI-Trägerkonstruktion.

Die Thermogramme zeigen ebenfalls, dass die bisherigen – relativ aufwendigen – Bemühungen bei der Luftdichtung sowie beim Komprimieren und Stopfen von Strohballenwänden aus wärmedämmtechnischer Sicht gerechtfertigt sind. Kritische Wärmebrücken, die nur in Ausnahmefällen auftraten, sind vermutlich auf Verarbeitungsfehler bei der Luftdichtung zurückzuführen. Eine Nachfolgeuntersuchung mit Hilfe eines Blower-Door-Tests wäre sinnvoll. Von innen nach außen durchgehende Holzbalken stellen – bei korrekter Luftdichtung – in der Regel keine kritischen Wärmebrücken dar. Die Untersuchung der Fugenbilder zeigt jedoch anschaulich, dass eine geringere Sorgfalt beim Stopfen der Fugen oder bei der Kompression der Ballen den Einfluss materialbedingter Wärmebrücken im Bereich von Durchdringungen verstärkt. Probleme mit Feuchtigkeit konnten bei keinem der untersuchten Strohballenhäuser festgestellt werden.

Im Gegensatz zu den bisherigen theoretischen Überlegungen, bei denen Wände mit stehenden Strohballen aufgrund ihrer U-Werte teilweise besser abschneiden als Wände mit liegenden Strohballen, zeigen die Thermogramme, dass sich bei allen Häusern mit hochkant oder aufrecht stehend eingebauten Strohballen keine homogen verteilte Oberflächentemperatur einstellt, bei den Häusern mit flach liegend eingebauten Strohballen hingegen schon. Diese Vorzüge einer wärmebrückenfreien Konstruktion sprechen dafür, weitere Forschung insbesondere zur lasttragenden

Zusammenfassung und Ausblick

Bauweise zu betreiben, auch wenn eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für lasttragende Gebäude in der Bundesrepublik in den nächsten Jahren (noch) nicht zu erwarten ist.

Abschließend ist zu bemerken, dass die wärmedämmtechnischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Wandkonstruktionen sehr gering und damit für die Planung eines Strohballenhau- ses nur mittelbar von Bedeutung sind. Um die Strohballenbauweise bekannter zu machen und bestehende Vorurteile abzubauen, sollten alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Konstruk- tionen weiter entwickelt und verbreitet werden. Auch wenn die Bohlenständerbauweise und die TJI-Trägerkonstruktion aus wärmedämmtechnischer Sicht etwas schlechter abschneiden, haben sie viele Vorteile, zum Beispiel dass ihr Platzbedarf geringer ist und dass der Bauprozess durch Vorfertigung effektiver gestaltet werden kann. Insgesamt können die Holzständerkonstruktionen, die in den letzten Jahren stetig weiter entwickelt worden sind, dazu beitragen, dass der Strohbal- lenbau schon bald konkurrenzfähig gegenüber dem Einsatz konventioneller Dämmstoffe wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Baehr, Hans-Dieter; Stephan, Karl: Wärme- und Stoffübertragung. Berlin/Heidelberg: 3. Auflage, Springer, 1998.
- [2] Barth, Hans Martin [Red.]: Naturdämmstoffe. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 2006.
- [3] Brink, Arne Nielsen: Einsatz der Impuls-Thermografie zur qualitativen zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, 2004.
- [4] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ) Nr. Z-23.11-1595; Wärmedämmstoff aus Strohballen. Berlin: 2009.
- [5] DIN EN ISO 6946:2008-04. Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren (ISO 6946:2007); Deutsche Fassung EN ISO 6946:2007.
- [6] Eichler, Jürgen: Physik kompakt. Grundlagen für das Ingenieurstudium - kurz und prägnant. Wiesbaden: 2. Auflage, Vieweg Friedr. u. Sohn Verlag, 2004.
- [7] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) [Hrsg.]: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Gülzow: 3. aktualisierte Auflage, 2009.
- [8] Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V.: Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52612; Prüfbericht Nr. F.2-430/03. München: 2003.
- [9] Fouad, Nabil; Richter, Torsten: Leitfaden Thermografie im Bauwesen. Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 2006.
- [10] Gabriel, Ingo; Ladener, Heinz [Hrsg.]: Vom Altbau zum Niedrigenergie- und Passivhaus. Gebäudesanierung, neue Energiestandards, Planung und Baupraxis. Staufen bei Freiburg: 7. Auflage, Ökobuch-Verlag, 2008.
- [11] GDI Gesamtverband Dämmstoffindustrie: Dämmstoffe für den baulichen Wärmeschutz, Übersicht über genormte Produkte. Hamburg: 2. überarbeitete Auflage, 1999.
- [12] Gruber, Herbert; Gruber, Astrid: Bauen mit Stroh. Staufen bei Freiburg: Ökobuch-Verlag, 2003.

Literaturverzeichnis

- [13] Heck, Friedrich: Energiekosten senken. Kosten und Nutzen von Wärmedämmmaßnahmen. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 2007.
- [14] InfraTec: Einführung in die Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie. Dresden: InfraTec GmbH, 2004.
- [15] InfraTec: Infrarot-Thermografiesystem: VARIOSCAN high resolution, Produktdatenblatt. Dresden: InfraTec GmbH, 2003.
- [16] Kern GmbH: Werkstoff-Datenblatt für Polyethylen hoher Dichte (PE-HD). Großmaiseid: Kern GmbH, Technische Kunststoffteile, 2009.
- [17] Krick, Benjamin: Untersuchung von Strohballen und Strohballenkonstruktionen hinsichtlich ihrer Anwendung für ein energiesparendes Bauen unter besonderer Berücksichtigung der lasttragenden Bauweise. Dissertation. Kassel: Universität Kassel, 2008.
- [18] Marquardt, Helmut: Energiesparendes Bauen. Von der europäischen Normung zur Energieeinsparverordnung. Stuttgart: Teubner-Verlag, 2004.
- [19] Minke, Gernot; Mahlke, Friedemann: Der Strohballenbau. Ein Konstruktionshandbuch. Staufen bei Freiburg: Ökobuch-Verlag, 2004.
- [20] Paul, Kerstin: Auslegung und Planung einer solarthermischen Anlage und einer Schwerkraftheizung für das Strohballenhaus Villa Communia. Diplomarbeit. Berlin: Fachhochschule für Technik und Wirtschaft, 2007.
- [21] Rex, Manuel; Reinschmidt, Jan: Einfach, autark, ökologisch; Bauen für die Zeit danach. Masterthesis. Wismar: Hochschule Wismar, 2007.
- [22] Stoller, Peter: Grundlagen der Gebäudehülle. Treiten: Grafitext-Verlag, 2002.
- [23] VDI/VDE 3511, Blatt 4: Technische Temperaturmessungen - Strahlungsthermometrie, 2005.
- [24] Volland, Karlheinz; Volland, Johannes: Wärmeschutz und Energiebedarf nach EnEV 2007. Schritt für Schritt zum Energieausweis für Wohngebäude im Neubau und Bestand. Köln: Rudolf-Müller-Verlag, 2008.
- [25] Weber, Helmut [Mitarb.]: Thermografie im Bauwesen. Grafenau/Wuertt.: Expert-Verlag, 1982.
- [26] Wedig, Harald: Bauen mit Ballen. Wohn- und Nutzgebäude aus gepresstem Stroh. Xanten: Organischer-Landbau-Verlag, 1999.
- [27] Wesche, Karlhans: Baustoffe für tragende Bauteile, Band 1: Grundlagen. Wiesbaden/Berlin: 3. Auflage, Bauverlag 1996.

A Beschreibung der zu untersuchenden Häuser

A.1 Überblick über die Standorte

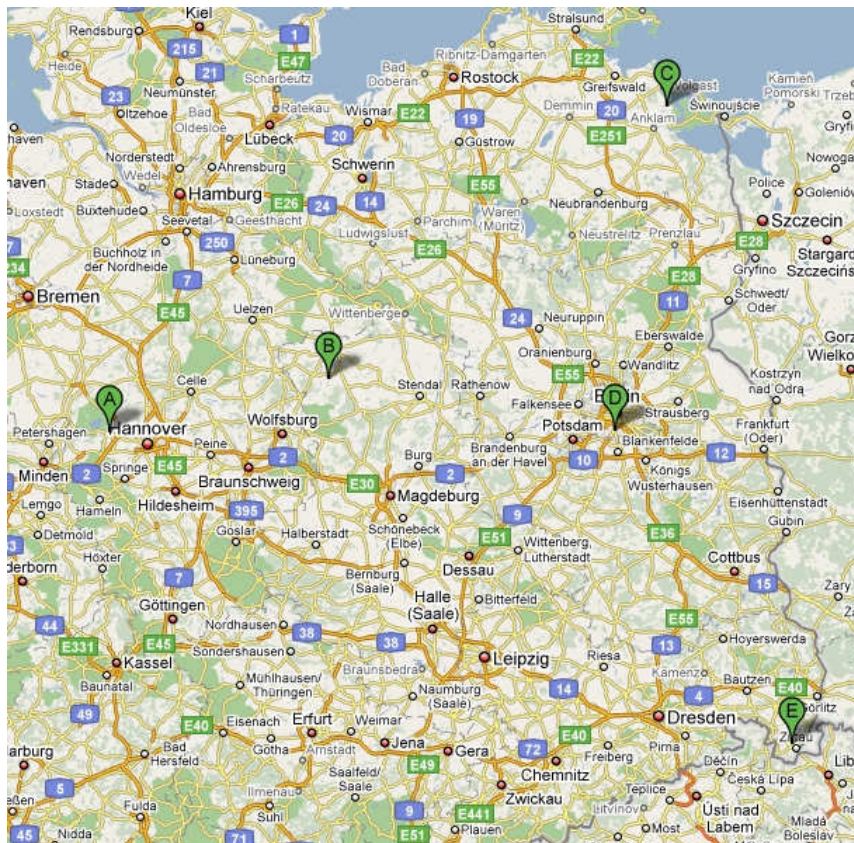


Abbildung A.1: Standorte der untersuchten Strohhallenhäuser: A - Wunstorf bei Hannover; B - Ökodorf Sieben Linden; C - Papendorf/Ostvorpommern; D - Berlin-Mariendorf; E - Mittelherwigsdorf bei Zittau

A.2 Einfamilienhaus in Mittelherwigsdorf



Abbildung A.2: Einfamilienhaus in Bohlenständerbauweise in Mittelherwigsdorf bei Zittau

Allgemeine Informationen	
Standort	02763 Mittelherwigsdorf
Nutzung	Einfamilienhaus
Nutzfläche	140m ² (EG 80m ² , OG 60m ²)
Bauweise	Bohlenständerbauweise mit Strohballenausfachung
Wanddetails	
Wandstärke	36 cm (davon 30 cm Stroh)
Ballenlage	hochkant liegend
Strohart	Gerste
Innenputz	3 cm Lehmputz
Außenputz	3 cm Kalkputz
Besonderheiten	
Wärmeerzeugung	Erdwärmeheizung
Heizung	Fußbodenheizung im EG und OG
Energiekonzept	Betriebswasseranlage
Wandkonstruktion	sehr kleine Ballenabmessung (30 x 40 cm)

A.3 Einfamilienhaus in Wunstorf



Abbildung A.3: Einfamilienhaus in Bohlenständerbauweise in Wunstorf (Idensen)

Allgemeine Informationen	
Standort	31515 Wunstorf/Idensen
Nutzung	Einfamilienhaus
Nutzfläche	130m ²
Bauweise	Bohlenständerbauweise mit Strohballeausfachung
Wanddetails	
Wandstärke	41 cm (davon 35 cm Stroh)
Ballenlage	hochkant liegend
Strohart	Weizen
Innenputz	3 cm Lehmputz
Außenputz	3 cm Lehmputz
Besonderheiten	
Heizung	Wandheizung
Wandkonstruktion	nur gering komprimierte Strohballewände

A.4 Einfamilienhaus in Papendorf



Abbildung A.4: Einfamilienhaus mit TJI-Trägerkonstruktion in Papendorf (Ostvorpommern)

Allgemeine Informationen	
Standort	17440 Papendorf
Nutzung	Einfamilienhaus
Nutzfläche	225 m ² (EG 125 m ² , OG 100 m ²)
Bauweise	TJI-Trägerkonstruktion mit Strohballenausfachung
Wanddetails	
Wandstärke	46 cm (davon 36 cm Stroh)
Ballenlage	hochkant liegend
Strohart	Gerste
Innenputz	5 cm Lehmputz
Außenputz	5 cm Kalkputz
Besonderheiten	
Wärmeerzeugung	Erdwärmeheizung
Heizung	Fußbodenheizung im EG und OG
Wandkonstruktion	Ringanker Parallam 18 x 36 cm

A.5 Gartenlaube in Berlin-Mariendorf



Abbildung A.5: Gartenlaube in lasttragender Bauweise in Berlin-Mariendorf

Allgemeine Informationen	
Standort	12109 Berlin-Mariendorf
Nutzung	Gartenlaube
Nutzfläche	15 m ²
Bauweise	Lasttragende Konstruktion
Wanddetails	
Wandstärke	51 cm (davon 45 cm Stroh)
Ballenlage	flach liegend
Strohart	Weizen
Innenputz	3 cm Lehmputz
Außenputz	3 cm Lehmputz
Besonderheiten	
Heizung	keine

A.6 Villa Strohbund in Sieben Linden



Abbildung A.6: Wohnhaus Villa Strohbund in Holzständerbauweise

Allgemeine Informationen	
Standort	38489 Ökodorf Sieben Linden
Nutzung	Wohnhaus
Nutzfläche	75 m ² (zweigeschossig)
Bauweise	Holzständerkonstruktion mit innen stehenden Holzständern, 5-10 cm Abstand zw. Rundholzkonstruktion und Strohballen
Wanddetails	
Wandstärke	ca. 53 cm (davon 45 cm Stroh)
Ballenlage	flach liegend
Innenputz	3-5 cm Lehmputz
Außenputz	3-5 cm Lehmputz
Besonderheiten	
Heizung	Stückholzöfen 6 kW (EG) und 8 kW (OG)
Spezifischer Heizenergieverlust	50 kWh/(m ² a)
Ökologie und Nachhaltigkeit	Verzicht auf industriell hergestellte Werkstoffe und elektrisch betriebene Werkzeuge, Einsatz von Recyclingmaterialien

A.7 Wohnhaus Strohpolis in Sieben Linden



Abbildung A.7: Wohnhaus Strohpolis in Holzständerbauweise (Sieben Linden)

Allgemeine Informationen	
Standort	38489 Ökodorf Sieben Linden
Nutzung	Wohnhaus
Nutzfläche	500m ² (dreigeschossig)
Bauweise	Holzständerkonstruktion mit innen stehenden Holzständern, Innenkante bündig
Wanddetails	
Wandstärke	ca. 60 cm (davon 45 cm Stroh)
Ballenlage	flach liegend
Innenputz	6-9 cm Lehmputz (3 Lagen)
Außenputz	4-6 cm Lehm (2 L), 2-3 cm Kalk (1 L)
Besonderheiten	
Wärmeerzeugung	Holzvergaserkessel, Solaranlage
Heizung	Wandheizung
Spezifischer Heizenergieverlust	63 kWh/(m ² a)
Wandkonstruktion	stark komprimierte Strohballewände

A.8 Haus auf der Brunnenwiese in Sieben Linden



Abbildung A.8: Wohnhaus auf der Brunnenwiese in Holzständerbauweise (Sieben Linden)

Allgemeine Informationen	
Standort	38489 Ökendorf Sieben Linden
Nutzung	Wohnhaus
Nutzfläche	240m ² (zweigeschossig)
Bauweise	Holzständerkonstruktion mit mittig stehenden Holzständern
Wanddetails	
Wandstärke	ca. 49 cm (davon 45 cm Stroh, nur im OG)
Ballenlage	flach liegend
Innenputz	3-5 cm Lehmputz
Außenputz	überwiegend holzverschalt
Besonderheiten	
Energiekonzept	Solaranlage 12m ² , Grundofen 20kW, Zentralheizungsherd 20kW
Spezifischer Heizenergieverlust	43 kWh/(m ² a)
Wanddämmung	EG mit Hanf, OG mit Strohbällen

A.9 Villa Communia in Sieben Linden



Abbildung A.9: Wohnhaus Villa Communia in Holzrahmenbauweise (Sieben Linden)

Allgemeine Informationen	
Standort	38489 Ökendorf Sieben Linden
Nutzung	Wohnhaus
Nutzfläche	259 m ² (zweigeschossig)
Bauweise	Bohlenständerbauweise mit Strohballenausfachung
Wanddetails	
Wandstärke	ca. 45 cm (davon 35 cm Stroh)
Ballenlage	aufrecht stehend
Innenputz	5 cm Lehmputz
Außenputz	5 cm Lehmputz
Besonderheiten	
Wärmeerzeugung	Schwerkraftheizung mit Solaranlage
Spezifischer Heizenergieverlust	54 kWh/(m ² a)
Wandkonstruktion	innen und außen stehende Bohle mit Luftspalt

A.10 Wohnhaus Windrose in Sieben Linden



Abbildung A.10: Wohnhaus Windrose in Holzrahmenbauweise (Sieben Linden)

Allgemeine Informationen	
Standort	38489 Ökodorf Sieben Linden
Nutzung	Wohnhaus
Nutzfläche	480m ² (zweigeschossig)
Bauweise	Bohlenständerbauweise mit Strohballenausfachung
Wanddetails	
Wandstärke	ca. 42 cm (davon 36 cm Stroh)
Ballenlage	aufrecht stehend
Strohart	Roggen
Innenputz	3 cm Lehmputz
Außenputz	3 cm Lehmputz
Besonderheiten	
Wärmeerzeugung	Stückholzvergaser, Solaranlage 20m ²
Heizung	Wandflächenheizung und Heizkörper
Spezifischer Heizenergieverlust	44 kWh/(m ² a)
Wandkonstruktion	hoher Grad der Vorfertigung; Bohle (6 cm) teilweise mit Weichfaser (2 cm) überdämmt