Ingenieurbüro Dr.-Ing. W. HORN
Energieeffizienz-Lüftung-Strahlenschutz
Bauwerksplanung und Begutachtung

Gesundes Wohnen = Wohlfühlklima mit Strahlungswärme, Feuchteschutz, hygienische-mindest-Lüftung, Schadstoff- und Energieminimierung
Sachverständiger für Schutz vor Radon
und bautechnischen Strahlenschutz

Gutachten

zur thermischen Isolierleistung von

Lu..po.Therm

TRMI = Thin Reflective Multifoil Insulation
= Wärmereflexionsstoff

Ausgangssituation:

In der Bauphysik wird fast ausschließlich mit der Thermodynamik gearbeitet. Diese erfasst allerdings nur einen Anteil von max. 10% des gesamten Wärme-Energie-Transportes.
Der dominierende radiative Anteil von >90% unterliegt der Quantenmechanik, er bleibt derzeit fast ausschließlich unberücksichtigt.

Zitat von NORMAPME:

Ihre Ergebnisse bestätigen, dass traditionelle Tests auf MW-, PS- + PU-Dämmstoffe anwendbar sind, jedoch nicht auf innovative auf Reflexion basierende Produkte.

Trotz dieser Erkenntnisse scheinen viele Institutionen den wissenschaftlichen Nachweis „in situ test" vom 16.04.2007 nicht akzeptieren zu wollen, sehr wahrscheinlich um die großen Dämmstoffhersteller zu begünstigen.

Lösung:

Der erweiterte EnEV-Nachweis mit IR-ENERGIE-PASS auf Basis von Strahlungswärme

Bearbeiter: Dr.-Ing. Wolfgang Horn, Köhra, 08.08.2012

Inhalt

1. Zusammenfassung 3
2. Aufgabenstellung 4
3. Vorgehensweise 4
4. Betrachtungen zum Wärmefluss 5
4.1. Wärmedurchgang durch feste poröse Stoffe 5
4.2. Wärmedurchgang durch Luftschichten 6
4.3. Wärmeübergangswiderstände Rsi und Rse 8
4.4. Wärmeabfluss von der Wand in die Außenluft 9
4.5. Zum Wärmefluss durch die Wand 11
4.6. Zum Wärmeeintrag in eine feste Oberfläche 11
4.7. Ergebnisse aus den Wärmeflussbetrachtungen 15
5. Informationen zum Wärmereflexionsstoff Lu..po.Therm 15
5.1. Vergleichsmessung - Technisches Datenblatt 16
5.2. Schreiben vom AG mit Artikel von C. Meier 16
5.3. Wärmeübertragung für Verbunddämm-Matte „Aluthermo Quattro" 16
5.4. Versuchsdurchführung von SFIRM Frankreich 17
5.5. Versuchsdurchführung TRADA England 17
5.6. Versuchsdurchführung IBP Fraunhofer Deutschland 17
5.7. Simulationsrechnung THERMREN 19
5.8. Mehrschichtige Wärmeisolierung mit IR-Reflexionsfolien 19
5.9. Klarstellung zur bauphysikalischen Wirkung Infrarot reflektierender Schichten 19
5.10. Potentiale und Grenzen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien 20
5.11. Untersuchungen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien 20
5.12. Reduktion von Wärmestrahlungsverlusten in Hochlochziegeln 21
5.13. Strahlung, Verschattung und Oberflächenübergang (2012) 21
6. Neuer Ansatz für den Wärmetransport 22
6.1. Strahlungswärme 22
6.2. Wärmeleitung in Luft und Folien 23
6.3. Konvektiver Wärmetransport, Brown`sche Molekularbewegung 24
7. Berechnung des Wärmetransports 25
7.1. Berechnungsannahmen 25
7.2. Ergebnisse 25
8. Literatur 29

1. Zusammenfassung

Für die Bewertung von TRMI = Wärmereflexionsstoffen gibt es noch keine gängige Berechnungsmethode. Vom Auftraggeber wird ein möglichst einfacher, nachvollziehbarer Berechnungsweg erwartet, mit dem die „ Wärmereflexionsstoffe" erfasst und für das TRMI-Material Lu..po.Therm daraus äquivalente Kennwerte analog der klassischen Wärmedämmung für eine vergleichende Isolierleistung ermittelt werden können.

Für die Untersuchung lagen Informationsmaterialien vom Auftraggeber und von verschiedenen Forschungsinstituten vor.

Zu Beginn wurden alle Aspekte der Wärme-Energie-Verlagerung untersucht, inwieweit sie für die Strahlungswärme nutzbar und auf den Wärmereflexions-stoff Lu..po.Therm übertragbar sind. Dabei stellt sich heraus, dass sie nicht nutzbar sind und es selbst für Konvektionswärmeprozesse erhebliche Widersprüche gibt:

(1) Wärmeübergangswiderstände sind unrealistisch und insbesondere für Strahlungswärme falsch.
(2) Die Wärme-Energie-Transport von Luft in feste Stoffe und gleichermaßen umgekehrt ist für die vorhandenen Wärmemengen mit Konvektion nicht erklärbar.
(3) Die Wärme-Energie-Verlagerung in festen porösen Baustoffen ist vielfältig und kann nicht allein durch Wärmeleitung, sondern nur gemeinsam mit Strahlungswärmeübertragung beschrieben werden.
(4) Für die Wärme-Energie-Verlagerung durch Luftschichten liegen falsche Kennwerte vor.
(5) Für die Wärme-Energie-Verlagerung ist es von ausschlaggebender Bedeutung, ob die Luft wärmer oder kälter als die festen Oberflächen ist. Weiter beeinflusst die Oberfläche selbst den Wärmübergang durch die Aufnahme oder das Aussperren von Kondensationsfeuchte.

Bei der Auswertung der vorliegenden Literatur ergaben sich sowohl gut verwertbare Hinweise als auch desaströse Darstellungen. Allgemein kann gesagt werden, dass vielfach mit falschen Formeln und Dimensionen hantiert wurde.

Für die Berechnung der Wärme-Energie-Verlagerung durch dünne, mehrlagige, reflektierende Funktionsschichten wurden die möglichen Wärmetransportarten untersucht.

Der Transport bzw. der Nichttransport infolge der IR-Reflektion wirkt wie eine sehr gute Wärmedämmung. Was reflektiert wird, braucht nicht mehr gedämmt zu werden.

Im Wärmereflexionsstoff Lu..po.Therm selbst wirken minimal nur Wärmeleitung durch Luft bzw. innerhalb der sehr dünnen Folienstege vom HD-PE. Die Kennwerte dazu wurden den übergebenen Unterlagen entnommen. Danach ergeben sich für 30 mm Lu..po.Therm folgende äquivalenten Kennwerte:

1.	**Wärmeleitzahl**	$\lambda_{äqi}$	=	**0,003**	**W/(mK)**
2.	**Wärmedurchgangswiderstand**	$R_{äqi}$	=	**10,0**	**m²K/W**
3.	**Wärmedurchgangskoeffizient**	$U_{äqi}$	=	**0,10**	**W/(m²K)**
4.	**Vergleichswärmedämmdicke**	$d_{äqi}$	=	**0,40**	**m** für WLG 040

Diese Werte

a) können durch Einbaubedingungen beeinflusst werden,
b) gelten für überwiegend vorherrschende Strahlungswärme mit wärmeren Oberflächen und dazu vergleichsweise niedrigere Raumlufttemperatur,
c) sind nicht übertragbar auf ähnliche Kompositmaterialien.

2. Aufgabenstellung

Für die Berechnung und Beurteilung des Wärmedurchgangs durch Materialien wird fast ausschließlich die eindimensionale konvektive Wärmeleitung und daraus folgend der U-Wert zugrunde gelegt. Beim Wärmereflexionsstoff Lu..po.Therm ist dieser Weg nicht zutreffend, so dass mehrfach und auf verschiedene Art versucht wurde, einen möglichst gut brauchbaren Berechnungsansatz für Strahlungswärme zu finden. Neben Berechnungsmöglichkeiten wurden auch empirische Messungen in Versuchsbauten vorgenommen.

In Deutschland sind für den Wärmedurchgang genormte Prüfanordnungen für die Bestimmung des Wärmedurchgangs zugrunde zu legen. Diese spiegeln jedoch nur den kleinsten Teil der physikalischen Gesetzmäßigkeit wider, was zu einem generellen Problem bei der Energieeffizienz führt. Die große Diskrepanz zwischen den empirischen Verbrauchswerten und den statisch fiktiven Bedarfswerten sind in der Praxis so offensichtlich, dass der bisherige Bezug allein über die Wärmeleitfähigkeit als unzureichend anzusehen ist. Aus diesem Grund wird nachfolgend versucht, eine erweiterte Betrachtung vorzunehmen, bei der die verschiedenen Wärmetransportmechanismen weitgehend berücksichtigt und ihr Einfluss abgeschätzt werden, was zudem nicht mit den Anwendungsbedingungen in der Praxis im Widerspruch stehen soll.

Die Aufgabe besteht somit darin, einen wirklichkeitsnahen bzw. vertrauenswürdigeren Kennwert für die thermische Isolierleistung für den Wärmereflexionsstoff Lu..po.Therm zu ermitteln.

3. Vorgehensweise

Bei Wärmebetrachtungen im Bauwesen handelt sich in der Regel um kurzwellige, hochenergetische Strahlungswärme der Sonne und Wärmetransporte im langwelligen niederenergetischen Bereich von etwa -20 bis +50 °C. Das gesamte Strahlungsspektrum ist IR-Strahlung, die so im Fokus stehende Wärmedämmung ist grundsätzlich immer mit allen physikalischen Vorgängen und Eigenschaften der Strahlungswärme verbunden, so dass es eigentlich einer differenzierten Unterscheidung zwischen bisher üblicher Wärmedämmung und den Infrarot-„ Wärmereflexionsstoffen" bedarf.

Mit verschiedenen Betrachtungen zum Wärmefluss durch Bauteile wird dargestellt, dass bisherige Vorgaben bzw. Annahmen durchaus nicht richtig, nicht vollständig und somit unzureichend sind. Gleichzeitig muss zugestanden werden, dass auch die darauf aufbauende Betrachtung nicht den Anspruch erheben kann, die exakte Lösung zur Beschreibung des Wärmetransportes durch den Wärmereflexionsstoff Lu..po.Therm zu liefern.

Für eine verlässlichere Beurteilung wird auf folgende Aspekte eingegangen:

(1) Einflüsse und Faktoren auf den Wärmefluss in Bezug auf
   a) den Wärmeeintrag in das Material,
   b) den Wärmedurchgang und
   c) die Wärmeabgabe

(2) Vorhandene Informationen zu IR-Reflexions-Stoffen
   Vorliegende Berichte werden erfasst und ihre wesentlichen Ergebnisse dargestellt.

(3) Für den Wärmedurchgang sind alle physikalischen Transportmechanismen zu beachten.

(4) Ziel soll eine möglichst einfache Bewertung für den Wärmedurchgang bzw. für die thermische Isolierleistung zu erhalten.

4. Betrachtungen zum Wärmefluss

4.1. Wärmedurchgang durch feste poröse Stoffe

Die Wärmeleitung wird durch die Dichte des Materials beeinflusst: mit größerer Dichte nimmt die Wärmeleitfähigkeit zu. Wenn man die Rohdichte von einem Stoff nur durch immer mehr Poren verringern kann, etwa wie bei Beton → Leichtbeton → Porenbeton → Schaumbeton und alle sonstigen Materialbestandteile unverändert lässt, ergibt sich für das nachfolgende mineralische Material folgender Kurvenverlauf von der Wärmeleitung.

Vollsteine und Vollblöcke aus Leichtbeton nach DIN 18152	
Rohdichte [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
500	0,32
600	0,34
700	0,37
800	0,40
900	0,43
1000	0,46
1200	0,54
1400	0,63
1600	0,74
1800	0,87
2000	0,99

Tab. 1: Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit von Leichtbeton

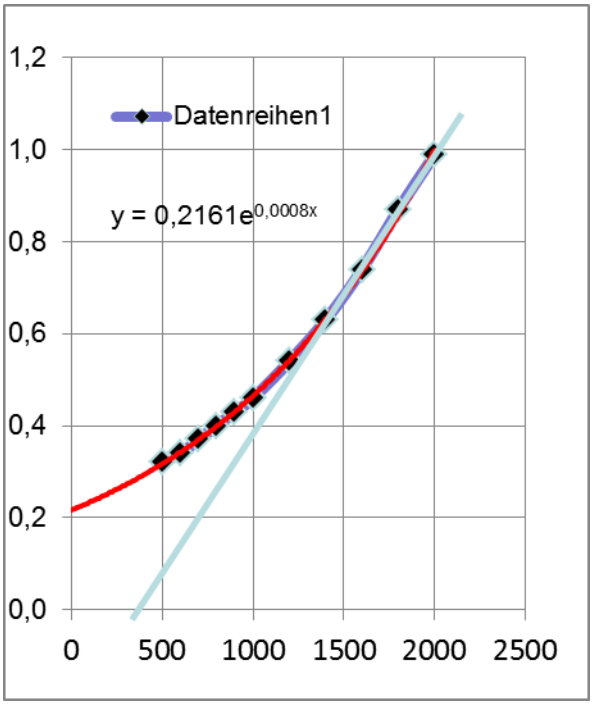

Abbildung 1: Extrapolierter Verlauf der Wärmeleitfähigkeit für Leichtbeton

Mit fallenden Rohdichten von 2.000 bis herunter zu 500 kg/m³ ergeben sich Wärmeleitwerte von 1,0 bis rd. 0,3 W/(mK).

Hieraus ist zu erkennen, dass nicht - wie man annehmen könnte - die Wärmeleitung auf den Wert Null zurückgeht, sondern darüber liegt, oder auch darunter liegen könnte, wenn nicht alle Werte einbezogen werden.

Wenn die Kurve die Abszisse bei einer nur wenig größeren Rohdichte als Null schneiden würde, gäbe es bei einer sehr niedrigen „Null"-Rohdichte keine Wärmeleitung mehr. Ein festes, wenn gleich sehr leichtes Material wäre dann ein idealer Dämmstoff, etwa wie das Vakuum. Das dürfte aber kaum möglich sein.

Extrapoliert man die Kurve von den Materialkennwerten der Tabelle 1 bis zur Ordinate mit der Rohdichte gleich Null, dann wird die Ordinate oberhalb der Abszisse mit der Rohdichte „Null" etwa bei rd. 0,2 W/(mK) geschnitten. Der λ-Wert für Luft ist wie bekannt 0,026 W/(mK), also deutlich geringer.
Entweder ist der Wärmeleitwert von Luft falsch, oder es liegt noch ein anderer dominanter Wärmetransport vor. Die Differenz zwischen dem Ordinatenwert und dem Wärmeleitwert könnte ein Wärmetransport infolge Konvektion, Strahlungswärme usw. oder einer Mischung derselben sein.

Übertragen auf Lu..po.Therm bedeutet dies, dass im Wärmereflexionsstoff gleichzeitig Wärmeleitung **und** Strahlungswärmetransporte stattfinden können.

4.2. Wärmedurchgang durch Luftschichten

Betrachtet wird ein Doppelfenster mit unterschiedlichem Scheibenabstand. Für die Wärmewiderstandswerte R gibt die DIN EN ISO 6946 folgende Werte für Luftschichten vor, Tab. 2:

mm-luft	R-m²K/W	U-W/(m²K)	λ-W/(mK)
Spalte 1	*2*	*3*	*4*
5	0,110	3,45	0,0220
6	0,120	3,33	0,0200
7	0,130	3,23	0,0186
8	0,137	3,15	0,0171
9	0,143	3,10	0,0159
10	0,150	3,03	0,0150
15	0,160	2,94	0,0107
25	0,180	2,78	0,0072
50	0,180	2,78	0,0036
100	0,180	2,78	0,0018
abw. 300	0,230	2,44	0,0008
horiz. 300	0,180	2,78	0,0006
aufw. 300	0,160	2,94	0,0005

Tab. 2 Vorgegebene R-Werte sowie errechnete λ- und U-Werte für Luftschichten

Aus den vorgegebenen Werten für die Dicke und den Wärmedurchlasswiderständen R [m²K/W] lassen sich die nicht in der DIN aufgeführten U-Werte in W/(m²K) Spalte 3 und Wärmeleitwerte λ in W/(mK) Spalte 4 berechnen.

Die Tabelle 2 bzw. Abbildung 2 definieren signifikante Widersprüche in der Norm bzw. werfen Fragen zur elementaren physikalischen Gesetzmäßigkeit auf:

- Der Wärmedurchlasswiderstand R ist unterschiedlich **dickenabhängig**:
  - Anfangs bis 25 mm erfolgt ein steiler Anstieg
  - dann konstant bis etwa 100 mm
  - dann wieder leicht ansteigend bis 300 mm.

  Der Widerstand aus den vorgegebenen Normwerten nimmt zu. Es sollte aber angenommen werden, dass mit größerer Schichtdicke eine Konvektion leichter möglich ist als in einer geringer dicken Schicht und demzufolge sollte der Wärmedurchlasswiderstand nicht größer, sondern kleiner werden.
- Der Wärmedurchlasswiderstand ist ab rd. 300 mm **richtungsabhängig**. Der Widerstand ist nach oben kleiner als nach unten – so kann unten (auf dem Fußboden) er-

wärmte Luft leichter aufsteigen, während an der Decke erwärmte Luft nicht nach unten abfallen kann. Ohne aktiv bewirkte Konvektion ist ein Wärmetransport mit Luftmassen von oben nach unten nicht möglich.

- Da Luft einen Wärmeleitwert von λ = 0,026 W/(mK) hat, ergibt sich die Frage: Wieso können dickere Luftschichten schon ab 5 mm Dicke kleinere, fallende Wärmeleitwerte haben als der vorgenannte für Luft kennzeichnende Wert?
  Eine Erklärung für **kleinere** λ-Werte wäre lediglich denkbar, wenn die Luft dünner wird. Der Wärmeleitwert würde dann bei Vakuum den Wert Null erreichen.
  Eine eventuell irgendwie gemittelte Wärmeleitung mit Einbezug von Strahlungswärme, wie es in einer Diskussion ein Bauphysiker zu den Berliner Energietagen 2012 ernsthaft zu erläutern versuchte, muss ebenso als unmöglicher Versuch gewertet werden, der bestehenden Berechnungsmethodik etwas Gutes beizupflichten. Jeglicher zusätzlicher Strahlungswärmeanteil in W/m², der absolut keinen Temperaturbezug wie der Wärmeleitwert λ mit W/(m·**K**) haben kann, könnte den Wärmeleitwert λ nur **vergrößern**.

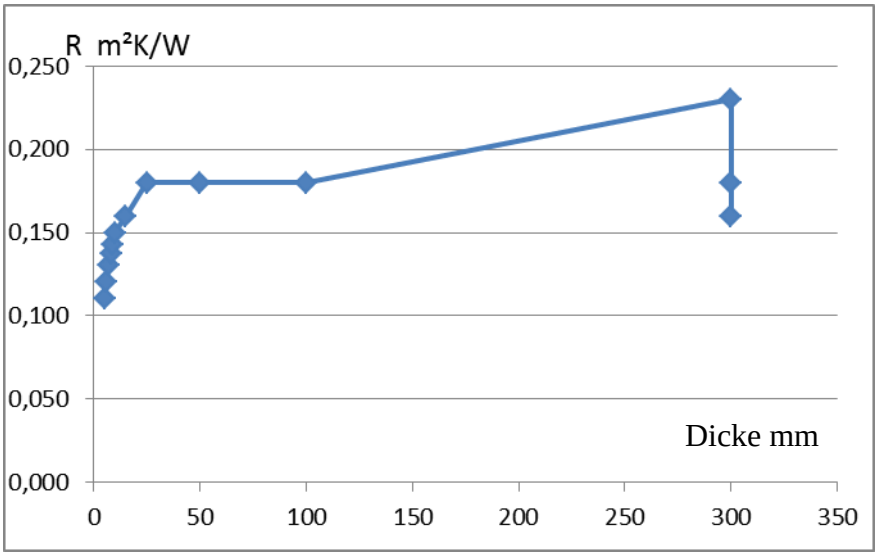

Abbildung 2: Abhängigkeit des Wärmewiderstandswertes von der Luftschichtdicke

Für ein Doppelfenster ergibt sich für die verschiedenen Wärmedurchgangs- und Wärmeleitwerte U und λ mit Rsi = 0,13 m²K/W und Rse = 0,04 m²K/W sowie für Glas Rg = 0,01 m²K/W folgende Darstellung.

Für Lu..po.Therm würden die gleichen Wärmeübergangswerte zutreffen, während die Materialien Glas beim Fenster oder Folien im Lu..po.Therm nahezu vernachlässigbar sind.

Im maßgeblichen Bereich bis 30 mm (= Dicke vom Lu..po.Therm) würden sich im Wärmereflexionsstoff mit seinen 13 dünnen Einzelschichten von < 5 mm Dicke U-Werte zwischen 2,7 und 3,5 W/(m²K) ergeben.

Eine weitere Betrachtung mit Berücksichtigung von Luftschichten in bisheriger Form ist für Lu..po.Therm somit nicht zielführend und ergibt völlig falsche Ergebnisse.

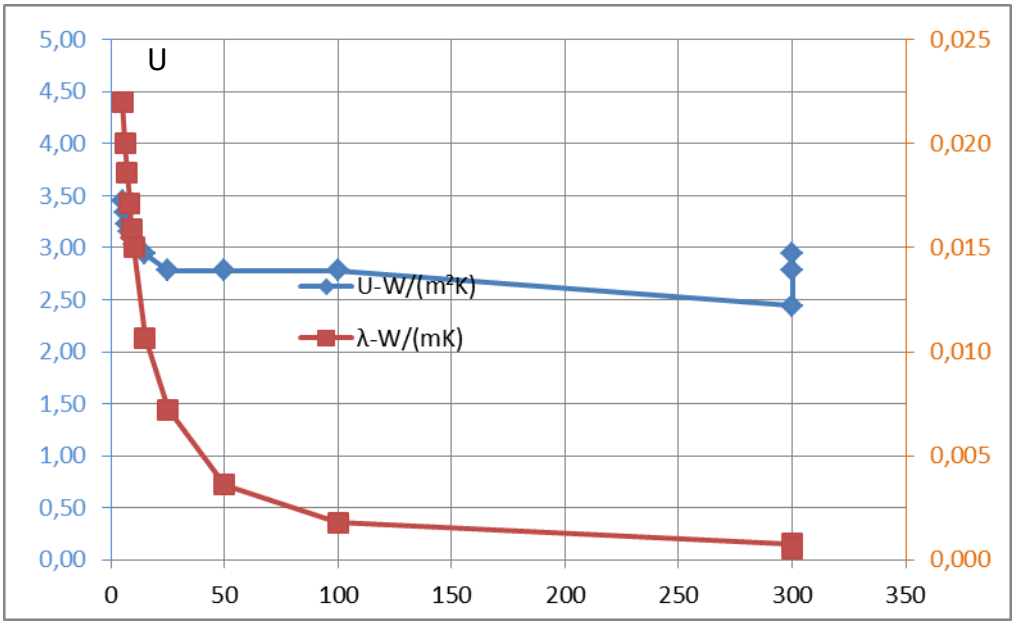

Abbildung 3: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und des U-Wertes von der Luftschichtdicke

4.3. Wärmeübergangswiderstände Rsi und Rse

In der vorangegangenen Berechnung wurden die üblichen Wärmeübergangswiderstände noch berücksichtigt. Diese sind jedoch wissenschaftlich zu hinterfragen.

Einbau von Lu..po.Therm:

a) Der Wärmereflexionsstoff sollte möglichst weitgehend frei bzw. maximal von Luft umspült sein, z.B. wenn er zwischen sich kreuzenden Latten eingebaut wird. Dies wäre der Fall, wenn Lu..po.Therm als Hüllmaterial bei Dach, Wand, Decke und Boden sowie an Rohren und Wasserbehältern mit Abstand angebracht wird.

b) Der Wärmereflexionsstoff kann ein- oder beidseitig an einer anderen Schicht anliegen.

Bei Kontakt spielen die bisherigen Übergangswiderstände eine Rolle. Inwieweit es dabei wirklich überall oder überwiegend nur punktuell anliegt, hängt von den Einbaubedingungen ab. Es wird direkt die Wärme weiter- bzw. abgeleitet. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass das benachbarte Material in einer Wand oder einer Decke in der Regel fester, von höherer Dichte und damit besser Wärme leitend ist.

Die Wärmeübergangswerte Rsi und Rse sollten temperaturunabhängig sein. Außen kann sich im Tagesverlauf bei Sonneneinstrahlung die Luft relativ schnell erwärmen und sie kann dann auf einer Schattenseite wärmer als die Wand sein. Dann müsste die Kurve nach oben kippen und dazwischen den Wert Null annehmen bzw. sie kann etwa täglich sogar mehrfach pendeln.

Frage: Mit welchem physikalischen oder anderem (chemischen, biologischen?) Vorgang soll der Wärmeübergangswert verknüpft sein bzw. wie lässt er sich erklären?

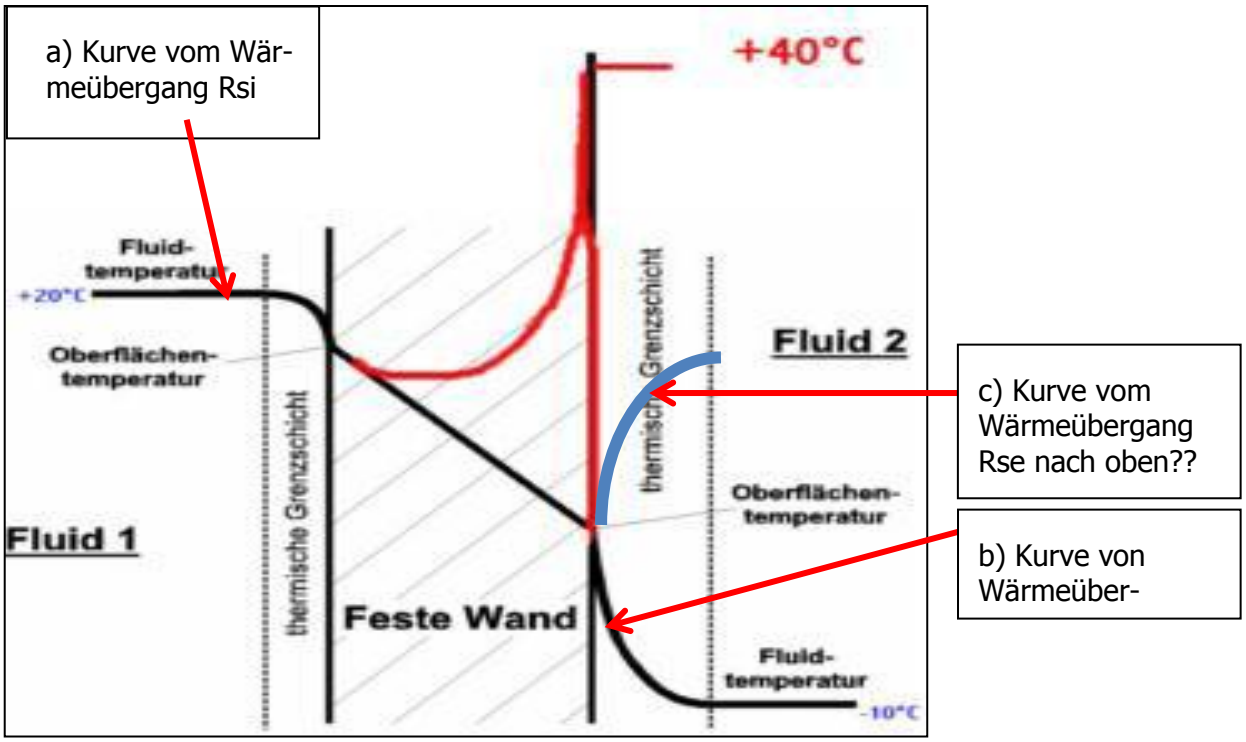

Abbildung 4: Ändert sich der Wärmeübergangswert mit sich ändernder Lufttemperatur?

Wenn Wärme von der Innenluft in die Wand hinein bzw. von der Wand in die Außenluft herausfließen soll, dann sollte es wieder nur mit den oben genannten Vorgängen Transmission, Konvektion, Strahlung und Brown´sche Molekularbewegung in Verbindung stehen. Darauf wird unten weiter eingegangen. Zur Strahlung kann aber schon jetzt gesagt werden, dass sie völlig unmaßgeblich für den Wärmeübergangswert ist – Luft ist für Strahlung diatherm, somit erfolgt keine dissipative Umwandlung von Strahlung in Wärme. Strahlungswärme geht somit unbehelligt von der Wand in den Raum bzw. ins Freie bzw. sie trifft ohne signifikante Hindernisse als wärmende Sonnenstrahlung auf der Wand auf.

4.4. Wärmeabfluss von der Wand in die Außenluft

Es kann gezeigt werden, dass es nicht möglich ist, aus einer üblichen verputzten Mauerwerkswand und einer Dicke von 40 cm die Wärme problemlos in die Außenluft weg zu leiten. Die ausführliche Betrachtung kann beim Verfasser eingesehen werden. Kurzfassung:

Betrachtet wird eine äußere Wandschicht von	60 mm Dicke
Pro Minute fließt Wärme aus	1 mm dickem Material weg
Damit soll diese Wandschicht in	1 Stunde auskühlen.
Mauerwerk hat eine Dichte von rd.	2,0 kg/dm³
Die Wärmespeicherkapazität beträgt	0,28 Wh/(kgK)
Temperaturdifferenz Wand – Außenluft, angenommen	9 K
Wärmemenge von 1 mm dicker Schicht	2,0 x 0,28 x 9 = 5 Wh/m²
Dichte von Luft, rd.	1,25 kg/m³

Luft hat etwa gleiche Wärmespeicherkapazität von	0,28 Wh/(kgK)
1 mm Wand = gleich warme Luftschicht von	2,0 / 1,25 = 1,6 m
Luft ist ein guter Isolator, erwärmte Luftschicht nur max.	0,1 m dick
Deshalb erforderlicher Luftaustausch pro m²-Wand	16-fach
Luft steigt hoch an Wand mit Höhe (angenommen) von	8 m
Das passiert	8 x 16 = 128 mal/min
Wärmeaustausch muss <50% sein, Faktor angesetzt	3
Luftwechsel pro Minute an dieser Wand	3 x 128 = 384 mal
Das entspricht einer Luftgeschwindigkeit von	384/60 = 6,4 m/s
oder	6,4 x 3,6 = 23 km/h
oder einer Windstärke	4 Bft (Beaufort-Skala)
Mittlere Windgeschwindigkeit in Deutschland	3 m/s < 6,4 m/s

Folglich müssten an der Wand und dann nach ein paar Metern abnehmend an einem windstillen Tag Luftbewegungen von doppelter Stärke als die mittlere Windgeschwindigkeit Deutschlands vorzufinden sein.

Hierbei wurden noch nicht alle Faktoren, wie z.B. Feuchtigkeit, berücksichtigt. Das Ergebnis zeigt, dass diese Modellbetrachtung die Wirklichkeit nicht richtig widerspiegelt. Anders ausgedrückt:

- Es ist nicht möglich, dass die Wärme ohne weiteres in ausreichendem Maße aus der Wand in die anstehende kühlere Luft abfließen kann.
- Dagegen kann IR-Strahlungswärme entsprechend des Strahlungsgesetzes von Stefan und Boltzmann permanent problemlos abstrahlen. Es wird aber gleichzeitig auch Strahlungswärme mit einer anderen Wellenlänge aus der Umgebung absorbiert.
- Bei einer Beurteilung/Bewertung eines Baustoffes/Dämmstoffes sind sowohl die Wärmeleitung als auch die Strahlungswärme einzubeziehen.
- Umgedreht kann gleichermaßen aus der (warmen Innenraum-)Luft keine Wärme ohne weiteres und in großer Menge in eine (massive) Wand eindringen.

Luft ist somit ein äußerst ungeeignetes Medium, das für Wärmeeintrag oder Wärmeableitung innen oder außen in bisherigen Berechnungen herhalten muss. Wenn mit Luft keine Erklärung ausreichend gut möglich ist, muss auf andere Art und Weise Wärme transportiert werden.

Mit Blick auf den Wärmefluss in bzw. aus Lu..po.Therm gilt dies im Prinzip auch. Es ist hier die geringere Speicherfähigkeit von Lu..po.Therm zu beachten. Sie ist etwa nur doppelt so groß wie Luft, s. Pkt. 7.2 Excel-Tabelle.

Da Lu..po.Therm in der Regel beidseitig direkt oder mit einem Abstand von wenigen Millimetern bis ein paar Zentimetern (seltener Dezimetern) „bekleidet" ist, sind wieder die Wärmetransporte von diesem benachbarten Material an die Luft maßgebend.

Somit muss bei der Beurteilung des Wärmetransportes auch beachtet werden, welche „Randbedingungen" insgesamt vorliegen.

4.5. Zum Wärmefluss durch die Wand

Der Wärmefluss in der Wand kann durch scheinbar einfache Differentialgleichungen 1. und 2. Ordnung beschrieben und gelöst werden. Nach H. Föll[1] gibt es keine einfachen Lösungen. Sie können mit ihren Annahmen vereinfacht werden, was sich nicht nachteilig auswirken muss, was eine bessere Anschaulichkeit erlaubt, die Berechnung vereinfachen und noch genügend genau sein kann.

In Punkt 4.4 wurde dargestellt, dass allein der Wärmeabfluss von der äußeren Wandschicht von 60 mm nicht mit einfacher Wärmeübertragung in die Außenluft erfolgen kann. Dabei wurde eine Temperaturdifferenz ΔT (hier mit 9 K) angesetzt. Bei einer Wandstärke von rd. 36 cm ergeben sich 6 solcher Schichten. In ihnen laufen die Wärmeflüsse zwar parallel ab, aber die Temperaturdifferenz ist nur 1/6tel davon und damit dauert der Prozess 6mal so lange. Es würde von einer Schicht zur anderen nur eine Temperaturdifferenz von 9/6 = 1,5 K abzubauen sein.

Die Berechnung des Wärmedurchgangs wird bekanntermaßen in der Praxis durch die Wärmeleitwerte λ_i und die zugehörigen Dicken d_i bestimmt. Daraus wird der U-Wert ermittelt. Wenn Wärmedämmmaterial an der **Innenseite** der Außenwand angebracht wird, besteht sofort die „Gefahr des Tauwasseranfalls, wodurch die Konstruktion versagt". Werden in der Berechnung auch die anderen Materialeigenschaften der Dichte und der Wärmespeicherfähigkeit einbezogen, dann fällt die Kurve des Temperaturverlaufs innerhalb der Wärmedämmung nicht schlagartig nach unten, sondern bleibt weitgehend oben. Die außen liegenden Masseschichten nehmen entsprechend ihrer Rohdichte und Wärmespeicherfähigkeit Wärme auf und geben sie dann entsprechend des b-Wertes weiter. Der b-Wert ergibt sich aus

$$b = (\rho * \lambda * c)^{0,5} \qquad Wh^{0,5}/(m^2K)$$

mit	ρ	Rohdichte	kg/m³
	λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
	c	Wärmespeicherfähigkeit	Wh/(kgK)

Der b-Wert erfasst außer der Feuchte die maßgebenden Baustoffeigenschaften wesentlichen besser. Wenn jedoch die Feuchte durch Strahlungswärme und einen speziellen Wandaufbau auf ein Minimum fallen und dort bleiben kann, spielt sie keine Rolle mehr. Der b-Wert hat vor allem den Vorteil, dass mit ihm die Zeit beim Wärmedurchgang mit eingeht. Bis auf die Zeit $h^{0,5}$ ist er von gleicher Dimension wie der U-Wert. Er kann somit wie bisher zur Bewertung der Dämmqualität eines Bauteils oder des gesamten Gebäudes genutzt werden, wobei er von gleicher Größe bei 1 Stunde ist. Dies trifft auch für die thermische Isolierung mit Lu..po.Therm zu. Der Wärmedurchgang kann anhand der noch zu ermittelnden Kennwerte ρ, λ und c für Lu..po.Therm ermittelt werden. Es gibt keinen Grund, nur einen Materialkennwert – die Wärmeleitung λ – zu berücksichtigen und die Rohdichte sowie die Wärmespeicherung auszuschließen.

4.6. Zum Wärmeeintrag in eine feste Oberfläche

In Pkt. 4.4 wurde deutlich, dass Wärme nicht einfach so aus z.B. einer Wandschicht in die Außenluft übergehen kann, sondern überwiegend abgestrahlt wird. Wie geht dann die Wärme von der Raumluft in die Wand hinein?

[1] Es gibt keine "*einfachen*" Lösungen des **2.** Fickschen Gesetzes; weder für unser Beispiel noch für andere "einfachen" Fälle. H. Föll, Internet

Die Innenraumluft mit ihrer gespeicherten Wärme kann es nicht ohne weiteres bzw. nicht allein sein. Es ist wie schon erwähnt Strahlungswärme von den unterschiedlich warmen Oberflächen aller Gegenstände und aller Umfassungsflächen. Alle Gegenstände haben eine mittlere Raumtemperatur angenommen und stehen mehr oder weniger im Gleichgewicht mit ihr. Außenwände geben Wärme nach außen ab, die innere Wandoberflächentemperatur sinkt etwas ab. Von allen wärmeren Raummassen wird im radiativen Austausch bis zum vollständigen Ausgleich sofort Wärme durch Strahlung nachgeliefert.

Nun muss es noch eine Quelle geben, die diesen Verlust insgesamt wieder ausgleicht. Das ist neben internen und solaren Gewinnen in der heutigen Zeit in erster Linie Konvektionswärme von z.B. Konvektor-Heizkörpern oder einer Fußbodenheizung. Beide Heizflächen geben in unterschiedlichem Maße Konvektionswärme - also warme Luft - und Strahlungswärme ab. Die Wärmetransporte durch Wärmeleitung von Luftmolekülen und durch Brown'sche Molekularbewegung in feste Oberflächenmasse können hier vernachlässigt werden.

Diese beiden Wärme-Energie-Transporte sind weiter zu betrachten.

A Strahlungswärme = Quantenmechanik

Bei Strahlungswärme wird je nach Material und Oberflächenbeschaffenheit die Energie sowohl reflektiert als auch absorbiert und anschließend wieder abgestrahlt. Bei Lu..po.Therm werden von der ersten Oberfläche rd. 85% der Infrarotstrahl reflektiert. Damit wirkt dieser Effekt wie ein Dämmmaterial mit einem sehr kleinen Wärmeleitwert. Von den 15% absorbierter Wärme wird die oberste Materialschicht erwärmt und strahlt Wärme mit entsprechender Wellenlänge von dieser Temperatur ab bzw. diese geht teilweise in die Luft über, sofern sie kälter ist als Lu..po.Therm. Der noch verbleibende Teil der Wärme geht durch Leitung und Strahlung in die inneren Schichten vom Lu..po.Therm hinein und wird anschließend durch 5 Kaskaden von Rückstrahlebenen minimiert.

Bei anderen Baustoffen wie Putz, Tapete oder Gipskartonplatten sind deren Reflektions- und Absorptionswerte maßgebend. Dieser Strahlungsvorgang ist unabhängig von der Lufttemperatur oder der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Wand; er hat die Dimension W/m² und nicht wie vielfach fälschlicherweise zu finden ist W/(m²K).

Wenn vor dem Wärmereflexionsstoff Lu..po.Therm z.B. eine Gipskartonplatte montiert wird, dann nimmt diese Platte die Wärmeeinträge aus dem Raum auf, leitet sie weiter und gibt sie von ihrer Oberfläche in Richtung Lu..po.Therm ab. Je nachdem ob ein Luftspalt oder ein flächiger Kontakt vorliegt, wird örtlich entweder Wärme zurückgestrahlt oder abgeleitet.

B Konvektionswärme = Thermodynamik

Bei Konvektionswärme wird bewusst durch - wie der Name sagt - bewegte warme Luft an kalte bzw. nur wenig kältere Oberflächen vorbei geleitet, damit sie dort ihre Wärme abgeben kann. Je besser die Wand gedämmt ist, desto kleiner ist meist der Temperaturunterschied zwischen Raumluft und Wandoberfläche, sofern keine Wärmebrücken mit größeren Temperaturdifferenzen da sind, an denen oftmals sichtbar Schimmel wächst.

Schimmel bildet sich dann, wenn u.a. Wasserdampf an der Wand kondensiert und sich als Wassermolekül dort anlagert. Wasserdampf kondensiert dann, wenn ein Phasenübergang von gasförmig zu wässrig durch Keimbildung oder Nukleation stattfindet, wie die Kondensation eines Gases, Eisbildung, Kondensstreifen und Beschlagen der Fenster.

„**Keimbildung** oder **Nukleation** ist der erste Teilprozess, der einen *Phasenübergang* erster Ordnung einleitet." [Quelle Wikipedia]

Herkömmlich wird unterschieden in

a) Klassische Keimbildungstheorie - erforderlich ist Übersättigung wie an einer Bierflasche

b) Heterogene Keimbildung - keine bzw. nur geringe Übersättigung erforderlich.

„In jedem Falle wirken **heterogene** Teilchen oder **Oberflächen** als ein **Katalysator** für die Keimbildung, in dem sie die Keimbildungsbarriere deutlich verringern." [Quelle Wikipedia]

Eine relative Luftfeuchte ab rd. 80% ist ausreichend für Schimmelpilzwachstum. Das ist ein Hinweis, dass Wasser in feinster Form vorliegt, ohne dass eine Übersättigung vorausgesetzt wird. Wasser ist ein besonderer Saft, hat mehr als 20 Anomalien, hat verschiedene Formen wie Ketten, Gruppenbildung, und „besondere" Zustände wie Energetisierung. Es muss davon ausgegangen werden, dass sich immer Wassermoleküle an der festen Oberfläche wie durch Katalysatoren niederschlagen können, sobald die Luft wärmer ist als die Wandoberfläche.

Je nach Beschaffenheit der festen Oberfläche gibt es unterschiedliche Situationen zwischen zwei Extrema. Das kondensierte Wasser

I. kann sich in die Oberfläche hinein bewegen, es wird regelrecht aufgesaugt wie bei Lehmputz,
II. bleibt auf der Oberfläche sitzen wie bei Glas oder bei metallischen/metallisierten Oberflächen.

<u>Zu I. saugende Oberfläche</u>

Wenn Wasserdampf kondensiert, wird die darin gespeicherte Energie frei. Diese Energie wird von der Oberfläche mehr oder weniger gut (je nach Materialeigenschaften) ins Innere geleitet, gleichsam wie das kondensierte Wasser. Die frei gewordene Energie und das Wasser sind „weg", zumindest von der Oberfläche. Wenn weiterer Wasserdampf kondensiert, passiert das gleiche wieder, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Als Folge des Wasseraufsaugens steigt die Wärmeleitfähigkeit stark an. Damit das kondensierte Wasser wieder in den Innenraum zurück verdampfen kann, muss neue Wärme auf die Oberfläche auftreffen, am besten als Strahlungswärme. Der Energieabfluss, der in die Wand hineingeht als auch der für das Wiederaufwärmen und Verdampfen wird umso größer, je besser die Luft im Raum zirkulieren kann. In warmen, genutzten Räumen wie Küchen oder Bäder mit zeitweise hoher Luftfeuchte ist immer damit zu rechnen, dass Energie und Wasser in die Wand hinein und nur wenig wieder heraus kommt. Beides - Wasser und Wärme - gelangen schließlich bis zur Außenoberfläche der Wand. Dort kann es bei üblichem, massivem Mauerwerk mit diffusionsoffener Putzoberfläche frei verdunsten, ohne dass Probleme entstehen. Anders ist es, wenn z.B. eine geschlossene Farbschicht die Wasserdampfdiffusion unterbindet und sich schon nach kurzer Zeit Blasen bilden und die Farbe abplatzt.

Bei Wärmedammverbundsystemen (WDVS) gilt es zu unterscheiden zwischen diffusionsoffener und diffusionsdichter

a) Dämmung und

b) Deckschicht bzw. Außenhaut

Bei der Dämmung gibt es alle Möglichkeiten zwischen den beiden Extrema:

(1) Der Prozess stoppt an der Dämmung etwas, wenn sie gut dicht ist gegenüber Wasserdampf, um dann über einen längeren Zeitraum die Dämmung aufzufeuchten, oder

(2) das Wasser wird zügig weiter geleitet.

Die Folge ist:

(3) Die Dämmung wird relativ schnell „absaufen",
wenn die Deckschicht/Außenhaut des WDVS wasserdampfdicht ist. Dort geht es nicht weiter; es sammelt sich dort.

Bei kalten ungenutzten Räumen kann der Prozess je nach relativer Luftfeuchte langsamer oder auch nicht auftreten.

(4) Die Dämmung kann trocken bleiben,
wenn durch eine diffusionsoffene und hinterlüftete Fassade die Feuchte abgeführt werden kann.

Zu II. dichte, nicht saugende Oberflächen

Bei dichter Oberflächen- oder Materialstruktur wie bei Glas geht kein Wasser hinein. Das kondensierte Oberflächenwasser bildet örtlich winzige bis größere nasse Flecken bis hin zu einem geschlossenem Wasserfilm. Dieses Wasser läuft ab oder verdunstet wieder beim Lüften oder durch neue warme Luft oder durch Strahlungswärme. Das kondensierte Wasser verleiht der Oberfläche andere Eigenschaften für die Aufnahme von Wärme und kann durch eigene Keimbildung wie in Gewitterwolken einen Selbstläufer in Gang setzen. Die frei werdende Kondensationswärme wird durch das Glas oder die dichte metallisierte Oberfläche infolge ihrer guten Wärmeleitfähigkeit zügig ins Materialinnere weiter weg geleitet.

Die leicht feuchte bis ganz nasse Oberfläche kann durch Luftbewegungen von der Konvektionsheizung oder durch Lüftung getrocknet werden, braucht dazu aber wieder mindestens die gleiche Energie aus der neuen warmen Luft, wie sie sie abgegeben hat. Diese Luft kühlt dabei ab und fällt bekanntermaßen an den Glasscheiben nach unten. Durch Mehrfachverglasung, spezielle Gasfüllungen und Abstandshalter soll der Wärmetransport an der Glasscheibe verzögert werden. Gleiches können/sollen die vielen Schichte der Wärmereflektionsstoffe bewirken. Wird Lu..po.Therm in eine solche Einbausituation oder Umgebung verbannt, dass warme, konvektive Luft darüber streichen kann, dann bildet sich Kondenswasser:

a) Es hat keine Reflektion mehr von rd. 85%,
b) es bildet sich darauf Wasser und
c) es wird wesentlich stärker Wärme weg geleitet bzw. sogar ausgekühlt.

Unter diesen Bedingungen kann Lu..po.Therm seine guten Eigenschaften nicht voll wirken lassen, es wird missbraucht. Aus diesem Grund kann in einer Prüfeinrichtung mit einem Heizstab, der konvektive warme Luft erzeugt, kein Wärmereflexionsstoff geprüft werden, der für Strahlungswärme entwickelt worden ist. Mit einer Montur geht man in die Baugrube, mit einem Anzug in die Oper oder ein Konzert; umgedreht ginge es zwar auch, aber das verbietet sich.

Soll für längere Zeit die Wandtemperatur wenigstens gleich der Lufttemperatur sein, kann Luft nicht das Transportmittel für Wärme sein, sondern es muss zwingend die Strahlungswärme wirken. Luft ist ein sehr guter Isolator, der nicht zum energieaufwändigen Wärmetransport missbraucht werden darf.

Die Raumuft muss also immer kälter sein, als die sie umgebenden Oberflächen. Das ist nur mit Strahlungswärme möglich und damit können die vielfältigen positiven Eigenschaften voll ausgeschöpft werden.

Diese Prozesse zum Wärmeeintrag in ein Material wurden deshalb ausführlicher beschrieben, um - vielleicht noch etwas unscharf formuliert - zu sensibilisieren, was Lu..po.Therm soll und kann und wofür es nicht missbraucht werden sollte.

4.7. Ergebnisse aus den Wärmeflussbetrachtungen

Die Beschreibungen 4.1 bis 4.6 von Details des Wärmedurchganges durch Bauteile sollen helfen, daraus Schlussfolgerungen für die Bewertung/Berechnung von Lu..po.Therm vornehmen zu können.

(1) Bei leichten, porigen Dämmstoffen wird nicht nur Wärme durch Wärmeleitung transportiert. Es findet auch eine Wärmeübertragung durch Strahlungsprozesse darin statt.

(2) Der Wärmedurchgang durch Luftschichten ist mit bekannten (DIN-)Vorgaben wie für dünne Luftschichten nicht beschreibbar, er führt zu unzulässig falschen Ergebnissen, was nur bei Vakuummaterial zutreffen würde.

(3) Wärmeübergangswerte sind außen für Lu..po.Therm und für seine inneren Oberflächen gleichermaßen unsinnig wie auch (trotz DIN-Vorgabe) an normalen Oberflächen.

(4) Der Wärmeabfluss von Lu..po.Therm in die Außenluft wird mit vom Material der umgebenden Konstruktionsschichten beeinflusst. Der übliche, vorhandene Wärmeabfluss in Luft aus Bauteilen ist ohne IR-Strahlung nicht möglich. Dies gilt auch für den Wärmezufluss.

(5) Ohne Berücksichtigung der Materialeigenschaften Rohdichte und Wärmespeicherung ist keine ausreichende Beurteilung des Wärmeflusses durch Materialien und demzufolge auch durch Lu..po.Therm nicht möglich.

(6) Der Wärmeeintrag in die Dämmung bzw. allgemein in eine Oberfläche ist ein vielschichtiger und von mehreren Faktoren abhängiger Prozess. Von ganz wesentlicher Bedeutung sind

- das Temperaturverhältnis Innenraumluft zu Materialoberfläche, als Wärmeeintrag durch die dominierende Strahlungswärme und durch geringe Konvektion
- die Oberflächenbeschaffenheit zwischen einschließlich der Extrema stark saugend bzw. gänzlich dicht.

Wenn dies nicht beachtet wird, können völlige falsche Interpretationen, bis hin zu falschen Schlussfolgerungen, vorgenommen werden.

5. Informationen zum Wärmereflexionsstoff Lu..po.Therm

Vom AG wurden folgende Unterlagen zur Verfügung gestellt:

1) Vergleichsmessung in drei Ländern und Technisches Datenblatt zu Lu..po.Therm
2) Schreiben vom AG mit Artikel von C. Meier
3) WLIK-Berechnung zur Wärmeübertragung für „Aluthermo Quattro" von Fa. Aluthermo AG Belgien
4) Versuchsdurchführung von SFIRM Frankreich
5) Versuchsdurchführung TRADA England
6) Versuchsdurchführung IBP Fraunhofer Deutschland
7) Simulationsrechnung THERMREN
8) Mehrschichtige Wärmeisolierung mit IR-Reflexionsfolien, J. Heihálek

Zur Strahlungswärme von Wärmereflexionsstoffen liegen noch folgende Unterlagen[2] vor:

9) Reduktion von Wärmestrahlungsverlusten in Hochlochziegeln; B+B-Forum
10) Klarstellung zur bauphysikalischen Wirkung Infrarot reflektierender Schichten; IBP-Mitteilung 479
11) Potentiale und Grenzen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien, IBP-Mitteilung 495
12) Experimentelle und theoretische Untersuchungen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien; Sonderdruck aus: Bauphysik 33(2011)
13) Strahlung, Verschattung und Oberflächenübergang; WUFI® Update-Seminar 2012

Auf diese Unterlagen wird nachfolgend eingegangen, wobei sie in Verbindung mit den vorigen Ausführungen zu bringen sind und es erlaubt ist, auf nach Sicht des Verfassers nicht korrekte Darstellungen aufmerksam zu machen.

5.1. Vergleichsmessung - Technisches Datenblatt

Hier sind die Ergebnisse der Vergleichsmessungen in Frankreich, Großbritannien und Deutschland gegenüber gestellt. Am längsten wurde in Frankreich gemessen. Es wurde auch ein Vergleich mit einem nicht gedämmten Gebäude geführt. Ein Gebäude mit einem nur 30 mm statt 200 mm dicken Dämmmaterial nochmals um 28% geringeren Energieverbrauch zu erreichen ist schon beachtlich, wobei der Wert vom nicht gedämmten Gebäude etwa dreifach darüber liegt.

Beim englischen Versuch wird eine Effizienzverbesserung von 5% festgestellt, beim deutschen Versuchsgebäude wird aufgrund divergenter Durchschnittstemperaturen von 21,4°C zu 22°C ein Vorteil von 2,8 % nachträglich errechnet.

Zum Datenblatt soll lediglich erwähnt werden, dass die physikalischen Gesetzmäßigkeiten mit falschen Formeln interpretiert werden. Darauf soll hier nicht weiter eingegangen werden, es wird auf die Ausführungen in [Meier10] verwiesen.

Um einen Vergleich bzw. Bezug zur üblichen Vorgehensweise beim Wärmeschutz-Nachweis zu ermöglichen ist es durchaus angebracht, den U-Wert, den Wärmeleitwert λ und den Wärmedurchgangswiderstand R aufzuführen, wobei auf den nicht unwesentlichen, durch Strahlung bedingten Unterschied, mit einem Koeffizienten explizit hingewiesen werden sollte. Strahlungswärme ist nicht an eine Temperaturdifferenz gebunden, die physikalische Dimension ist nur W/m².
Weitere Werte des Datenblattes werden später noch genutzt.

5.2. Schreiben vom AG mit Artikel von C. Meier

Hierauf einzugehen ist nicht erforderlich, bis auf einen Hinweis, dass auf Seite 2 rechte Spalte oben 4. Zeile wohl versehentlich 475 statt 949 W/m² steht.

5.3. Wärmeübertragung für Verbunddämm-Matte „Aluthermo Quattro"

In diesem Artikel wird für das Material von Fa. Aluthermo AG Belgien mit einem vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik nach DIN EN 12667 ermittelten Wärmedurchlasswiderstand und einem vorgegebenen Dachaufbau der Wärmedurchgang berechnet. Eine Verbundwärme-

[2] Diese Unterlagen wurden dankenswerter Weise von Herrn Dr. Jörg Walter zur Verfügung gestellt.

dämm-Matte liegt zwischen der Dachdeckung, der Gipskartonplatte und beidseitigen Luftschichten.

Für die Berechnung wurde der von FIB ermittelte Wärmedurchlasswiderstand zugrunde gelegt. Inwieweit dieser Wert die Strahlungsbedingungen in der Prüfkammer mit umfasst und somit gerechtfertigt ist, ist offen. So wird in der Beschreibung auf den Emissionskoeffizienten hingewiesen, in die weitere Berechnung geht er nicht mit ein.

In der Berechnung wird das Stefan-Boltzmann-Gesetz angewandt. Es wird zwar mit Strahlungswärme gerechnet, jedoch unzulässig stark vereinfacht bzw. mit falscher Formel gerechnet. Es wird nur die Differenz der Strahlungswärme angesetzt, ohne den Strahlungsausgleich durch Addition zwischen den Schichten und den vielfachen mit Lichtgeschwindigkeit statt findenden Strahlungsausgleich zugrunde zu legen.

Innerhalb der Materialkomposition ist mit dem doppelten Wert für polarisierte Hohlraumstrahlung zu rechnen. Lediglich von den Dachziegeln geht Halbraumstrahlung in die Umgebung hinaus bzw. kommt Umgebungsstrahlung auf die äußere Dachfläche zurück.

Auch werden Umgebungswerte von +20°C bzw. -20°C zugrunde gelegt, die einen Extremfall darstellen, der für die Auslegung der Heiztechnik angebracht sein kann, aber nicht als Charakteristikum für ein Bauteil.

Aus meiner Sicht liegt ein lobenswerter Versuch vor, mit Strahlungsformeln den Wärmedurchgang im Dachaufbau zu berechnen, zufriedenstellend ist er nicht.

5.4. Versuchsdurchführung von SFIRM Frankreich

Auf die Versuche in den drei Ländern wurde oben schon kurz hingewiesen. Dazu kann ergänzt werden:

- Die Messungen ergaben in Frankreich einen um 30% geringeren Energieverbrauch mit Strahlungsdämmung (21,3 W/C°) gegenüber Mineralwolle (29,8 W/C°).
- Die Prüfanordnung (hot box or hot plate) zur Bestimmung der thermischen Effizienz von Mineralwolle ergibt 3 bis 5fach höhere R-Werte als für Strahlungsdämmmaterial und wird deshalb schon von der Fa. sfirmm infrage gestellt.
- Die stündlichen Verbrauchswerte streuen bei Mineralwolle wesentlich stärker, was sich durch Windeinfluss erklären lässt, was aber beim fiktiven Messen im Labor nicht erkannt werden kann.
- Die gesamte Versuchsauswertung kann noch beeinflusst werden durch den Wärmeabfluss über die Bodenplatte und durch Wärmebrücken. Je größer deren Flächen bzw. Auswirkungen sind, desto mehr wird der Unterschied zwischen den beiden Materialien verringert.

5.5. Versuchsdurchführung TRADA England

Weitere maßgebliche Aussagen lassen sich aus den übergebenen Unterlagen nicht ableiten.

5.6. Versuchsdurchführung IBP Fraunhofer Deutschland

Entgegen der obigen Zusammenstellung vom Datenblatt kann aus Tabelle 2 (Blatt 19) vom IBP-Bericht entnommen werden, dass sich ein verminderter Energieverbrauch von rd. 12% ergibt (C2-Referenzhaus 239,8 kWh, C1-ACTIS-Haus 209,7 kWh). Auch bei umgerechneten spezifischen Werten W/(m²h) lässt sich daraus kein besserer Bezug ableiten, da auch wie schon bemerkt die gesamte gedämmte Fläche bzw. andersartig gedämmte und ausgebildet

Flächen, Wärmebrücken, Standorteinflüsse, Jahreszeit und damit Relation zur (mittleren, maßgebenden) Temperatur usw. mit in die Bewertung eingehen.

In dem Bericht werden auf Blatt 22 die typischen und fast identischen Messdaten vom Referenzhaus und ACTIS-Haus nebeneinander aufgeführt. Danach verbraucht das ACTIS-Haus 0,2% mehr Heizenergie. Das kann sich in etwa mit dem Kurvenverlauf auf Blatt 23 decken, wirft aber zwei Fragen auf:

(1) Warum ergeben sich so drastische Unterschiede am Anfang und Ende der Messperiode?
(2) Warum ist die Mineralfaserdämmung im fast gesamten dazwischen liegenden Bereich sogar besser mit weniger Verbrauch?

Eine Erklärung bietet Bild 24 mit der Windgeschwindigkeit. Der Wärmeverbrauch korreliert mit der Windgeschwindigkeit. Das Referenzhaus mit seiner Mineralfaserdämmung ist luftiger und verliert damit leichter konvektiv Wärme. Nach Blatt 21 hat das Referenzhaus mit n_{50} = 1,3 h^{-1} auch eine schlechtere Dichtheit als das ACTIS-Haus mit n_{50} = 0,9 h^{-1}. Die scheinbar so luftigen Folien lassen sich offenbar besser verarbeiten und bieten eine größere bzw. zusätzliche Dichtheit als die Mineralwolle. Dennoch ist die Dämmung mit Mineralwolle im mittleren Bereich wirksamer, wenn der Wind nicht wäre.

Die kalte Witterung zu Beginn der Messung kann bei beiden Häusern ebenfalls zu höherem Energieverbrauch führen, was sich gemäß Blatt 23 beim C1-ACTIS-Haus (grüne Linie) aber eigenartigerweise nicht deutlich ausprägt. Auf diesem Blatt liegt beim ACTIS-Haus der maximale Energiebedarf bei rd. 24 kWh/d, das C2-Mineralfaser-Referenzhaus bei etwas über 30 kWh/d (schwarze Linie).

In Blatt 25 sind die Energie-Verbräuche mit der Temperatur und der Windgeschwindigkeit gemeinsam dargestellt. Hier sollte die beiden Häuser beim Energieverbrauch wieder die gleiche Form mit Überschneidungen und Beträgen aufweisen. Das ist jedoch nicht der Fall, die Kurven vom Referenz- und ACTIS-Haus liegen deutlich auseinander. Danach müsste das ACTIS-Haus nicht nur 0,2% mehr Energie verbrauchen, sondern wesentlich mehr. Nimmt man entsprechend der gemittelten (polynomischen) Kurve die Verbräuche für C2-Referenzhaus zu rd. 3,7 W/m² und für das C1-ACTIS-Haus zu rd. 5,8 W/m² an, dann ergibt sich ein fiktiver Mehrverbrauch von 5,8/3,7 ≈ 1,56 also 56%.

Wenn sich nicht eine einleuchtende Erklärung finden lässt, dann ist es schon mehr als merkwürdig, wenn innerhalb eines Berichtes von einem deutschen Institut, das den Anspruch erhebt eine führende Einrichtung zu sein, derart widersprüchliche Darstellungen vorliegen.

Im Bericht wird auf die Mechanismen des Wärmetransportes verwiesen. Dabei wird wie bisher schon bei der Strahlungswärme mit nicht zutreffenden Temperaturdifferenzen gearbeitet. Ob und wie diese in die Versuchsauswertung mit den Prüfkammern eingeht, kann nicht entnommen werden. Zumindest wird wie in Blatt 27 dargestellt mit einer Heizwendel neben warmer Luft auch in starkem Maße Strahlungswärme erzeugt, die über die reflektierenden Umfassungswände auch den Prüfkörper erreicht. Die Abschirmung kann das nicht verhindern.

So muss angenommen werden, dass neben Wärme aus Wärmeleitung auch Strahlungswärmeanteile in die Werte für die Wärmeleitung eingehen. Diese λ-Werte sind dann überhöht. Das ist bei massigen, festen Stoffen wie Glas, Holz oder Schwerbeton nahezu unbedeutend, für leichte, lockere und mehrlagige Wärmereflexionsstoffe jedoch von Nachteil in der Bewertung.

5.7. Simulationsrechnung THERMREN

Diesen Unterlagen werden die Daten für die Wärmereflektion und andere Kennwerte entnommen.

5.8. Mehrschichtige Wärmeisolierung mit IR-Reflexionsfolien

Diese längere Ausarbeitung von Heihálek ließ ursprünglich vermuten, dass sie umfangreiche und wertvolle Grundlagen enthält. Trotz mehrmaliger Durchsicht zeigte sich, dass sie nach Ansicht des Verfassers auf scheinbar naheliegenden, aber nicht zulässigen Detailannahmen fußt, wie sie wohl weitgehend verbreitet sind. Sie wird von mir dennoch als wertvoll angesehen, da sie umso mehr zum Nachdenken zwingt und letztlich hilft, zu einer neuen Betrachtung zu gelangen.

Gleich zu Beginn werden die oben schon betrachteten Wärmeübergangswiderstände mit einem Strömungswiderstand r_K und Strahlungswiderstand r_s – alle in W/(m²·**K**) berücksichtigt, obwohl im Bericht erwähnt wird (Text vor Formel 2): „Die Luftströmung in so einer dünnen Schicht vernachlässigen wir." Also wird dieser Luftströmungswiderstand unwirksam, gleich Null. Wie oben schon erwähnt gibt es keinen temperaturabhängigen Strahlungswiderstand.

Mit diesen nicht nachvollziehbaren Widerstandswerten wird mit der Gesamtdicke von 0,03 m eine Wärmeleitzahl errechnet, die **kleiner** als Luft ist. Darauf wurde ebenfalls schon oben eingegangen; auch hier ist keine dünnere Luft oder gar ein Vakuum vorhanden, die das ermöglichen würden.

Mit Formel (5) und zuvor schon mit der Mittelwertbildung der benachbarten Temperaturen $T = (T_1+T_2)/2$ wird wieder gegen das Stefan-Boltzmann-Gesetz verstoßen. Weiterhin ist zumindest innerhalb der 5 metallisierten und reflektierenden Kunststoff-Folien von polarisierter Hohlraumstrahlung auszugehen, die den Faktor 2 erfordert.

In seinem Beispiel 2 werden ähnliche Überlegungen angestellt, der Wärmeleitungswert λ geht hier sogar bis auf ca. ein Fünftel des Wertes von Luft zurück.

Letztlich ergeben sich für Lu..po.Therm die Werte R_{LT} = 5,00 m²W/K, λ_{LT} = 0,006 W/(mK) und U_{LT} = 0,17 W/(m²K) aus 4 Doppellagen (von je 0,75 cm Einzeldicke) der PE-Luftpolsterfolien und der metallisierten IR-Schichten mit den Wärmeübergangs-, Strömungs- und Strahlungswiderständen und auch unter Beachtung der Wärmeleitfähigkeit der Luftpolsterfolie mit unterschiedlichem Anteil p und 1-p mit $p= 6{,}54*10^{-4}$ für Luft bzw. Folie unter Nutzung eines elektrischen Ersatzmodells.

Diese Ergebnisse können als eine vorerst ausreichend gute Näherung angesehen werden, die mit den positiven Erfahrungen aus der Praxis überein stimmt und sich zu recht deutlich von anderen Berechnungen abhebt, die mit unzureichenden, in erster Linie auf thermodynamischen Ansätzen arbeiten. Es ist jedoch zu beachten, dass grundlegende Bedenken in der Anwendung von den Wärmewiderständen und dem Gebrauch von Strahlungsformeln bestehen.

5.9. Klarstellung zur bauphysikalischen Wirkung Infrarot reflektierender Schichten

Im Bericht von Künzel und Sedlbauer wird positiv dargestellt, dass mit Hilfe von Infrarot reflektierende Schichten ein Beitrag zur Energieeinsparung geleistet werden kann. Erfreulich ist die bildliche Darstellung, dass die Wärmestromdichte durch Strahlung die durch Konvektion mehrfach übertrifft – ein Weg dahin, den wirklichen Vorgängen in der Natur und in den Bauwerken viel näher zu kommen.

Die ermittelten Ergebnisse für reduzierte Wärmegewinne nehmen sich aber bescheiden aus, so dass man sie wohl auch vergessen könnte. Es soll aber den Hinweisen gefolgt werden, dass

- sich ohne Luftschicht keine Wirkung einstellt
- feuchtetechnische Problem ergeben können und
- Alterung und Verschmutzung zu beachten sind.

Diesen Punkten kann entgegen gewirkt werden:

- Mehrfache Luftschichten sind bei Lu..po.Therm immanent.
- **Durch Strahlungswärme mit warmen Oberflächen können feuchtetechnische Problem gänzlich vermieden werden**.
- Alterung dürfte bei Lu..po.Therm in Bezug auf PE + PP kein gravierendes Problem sein, da es vor UV-Strahlung sicher eingebaut werden kann. Vergleiche aus der Deponietechnik können hilfreich sein.
- Verschmutzung sollte ebenfalls gänzlich entfallen können, da Lu..po.Therm meistens zwischen schützenden Schichten eingebaut werden kann oder auch zugänglich und damit kontrollierbar sein kann.

Eine Aussage fehlt und soll ergänzt werden: Wenn eine wirksame IR-reflektierende Schicht da ist, geht auch nur noch maximal der absorbierte Teil ins Innere hinein. Das ist bei 90% Reflektion eine unheimlich gute adäquate Wärmedämmung. Dem positiven Ausblick wird gern weiter nachgegangen.

5.10. Potentiale und Grenzen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien

Dieser Bericht ist offenbar eine Kurzfassung von Pkt. 5.6 als IBP-Mitteilung ohne deren widersprüchlichen Aussagen.

Als Ergebnis wird darin festgehalten, dass *„… über das Dach mit dem IR-Dämmsystem ca. 2,5-mal soviel Wärme verloren geht wie über das Dach mit dem Mineralwolle-Dämmsystem.*"

Auf die parallel laufenden Versuche in Frankreich und England und auf die erwähnten Widersprüche von Pkt. 5.6 wird nicht hingewiesen. Damit hätte man Fragen stellen und nach Antworten suchen müssen.

5.11. Untersuchungen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien

Dieser Bericht von IBP Fraunhofer stellt gewissermaßen die Fortsetzung der Untersuchungen von Pkt. 5.6 dar. Hier werden Messergebnisse beschrieben, die eindeutig durch konvektiven Wärmeeintrag bewirkt werden. Den Ergebnissen und auch den Schlussfolgerungen kann und braucht nicht widersprochen zu werden, wenn man den allgemein üblichen konvektiven Wärmeeintrag zugrunde legt und ausschließlich konvektive Aussagen haben möchte.

Man kann sich aber einem tendenzieller Eindruck nicht erwehren: Ein Dämmmaterial wird als IR-Dämmmaterial bewusst hervorgehoben. Dabei sind alle anderen Dämmmaterialien auch IR-dämmend, denn es sind die gleichen Wärmestrahlen aus dem Strahlungsspektrum. Und es soll durch falsche Versuchsanordnungen und -auswertung der Eindruck entstehen, es sei mit herkömmlicher Betrachtungsweise korrekt und umfassend gearbeitet worden. Korrekt mit falscher Untersuchungsmethode kann akzeptiert werden, aber nicht umfassend und zutreffend auf den Wärmeeintrag mit Strahlungswärme (ohne Konvektion und mit geringerer

Lufttemperatur als die Oberflächentemperatur, nur die Thermodynamik braucht die Übertemperaturen).

Der Aussage *„Traditionelle Labormessungen können also auch bei der energetischen Bewertung von IR—reflektierenden Dämmfolien angewendet werden."* (vorletzte Spalte, vorletzter Absatz, 2. Satz) muss widersprochen werden, da sie unvollständig ist und dem Gedanken eines geringeren Energieverbrauchs und der Suche nach wirtschaftlicher Energieanwendung kontraproduktiv gegenüber steht. Aufschlussreich ist auch, das NORMAPME am 16.04.2007 das wissenschaftliche Kolloquium beim IBP in Stuttgart durchgeführt hat, wo folgende Ergebnisse aus der empirischen 3-Ländertest vorgetragen wurden. Verbrauchsmessung 20 cm Mineralwolle gegen 3 cm TRMI = im Durchschnitt 11% weniger Energieverbrauch in kWh bei den Wärmereflexionsstoffen. Dies führte beim CEN im TC89 zur WG13 für „in situ tests".

5.12. Reduktion von Wärmestrahlungsverlusten in Hochlochziegeln

Durch Beschichtung der Innenkammern von Hochlochziegeln mit reflektierenden Materialien soll der Strahlungsanteil beim Wärmetransport reduziert werden [Hintz&al]. Bei den meisten unbeschichteten Ziegeln liegt der Strahlungsanteil bei 30%. Damit wird die Aussage von Strahlungswärme in festen feinporigen Baustoffen wie oben in Pkt. 4.1 mit rd. 20% bestätigt. Ihr Anteil liegt erwartungsgemäß wegen der großen Hohlräume sogar höher.

Die Bewertung des Wärmetransports in Baustoffen ist also mit nur einem λ-Wert zumindest unvollständig, sie braucht für die Energieeffizienzbewertung eine vollständigere Messmethode und Beurteilung.

5.13. Strahlung, Verschattung und Oberflächenübergang (2012)

Im WUFI®-Update-Seminar 2012 wird u.a. auf externe Strahlung verwiesen. Auf ein paar Aussagen, die in den normalen Berechnungen zum Wärmeschutznachweis fehlen, soll eingegangen werden:

„Bereits geringe nächtliche Unterkühlung von Außenoberflächen führt zu Taupunktsunterschreitungen und Tauwasserausfall."

„Tauwasserausfall kann zu Pilz- und Algenbewuchs an der Außenoberfläche führen."

Durch Integration des Planck'schen Strahlungsgesetzes erhält man die Ausstrahlung eines Schwarzen Körpers in W/m².

Dann wird auf die DIN EN ISO 6946 verwiesen, dass es den Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung in W/(m²**K**) gibt.
So wird diskussionslos erwähnt, dass es für Strahlung einen Wärmeübergangskoeffizient gibt, der mit einer Temperaturdifferenz ΔT in Bezug steht. Im WUFI-Programm wird die Physik einerseits beachtet, andererseits duldet man kritiklos die falsche Norm.

Erfreulich ist die Darstellung der expliziten Strahlungsbilanz. Hier wird deutlich sichtbar, wie die Strahlungswärmegewinne mit **325 W/m²** über die Wärmeanteile von Konvektion mit nur 15 W/m² und Transmission mit **5 W/m²** anteilsmäßig mit ca. 94% dominiert. → Das muss schon als ein Riesenschritt in der Versachlichung der Betrachtung von Wärme-Energieprozessen im Bauwesen durch ein Institut angesehen werden.

Im Weiteren wird die externe Strahlung in 7 Teilstrahlungen aufgespaltet und eine explizite Strahlungsbilanz aufgestellt. Sie kann genutzt werden für die Simulation der Ein- und Abstrahlung von Dächern, die quantitative Beurteilung von Tauwasserbildung auf Oberflächen und die Berücksichtigung geringer Emission von blanken metallischen Oberflächen.

Leider fehlt die konsequente Erweiterung auf den Wärmehaushalt **im** Gebäude.

Ein positiver Bezug auf geringe Emissionen blanker Oberflächen wie bei Lu..po.Therm ist hiernach erlaubt.

6. Neuer Ansatz für den Wärmetransport

Die theoretischen Grundlagen (mit und ohne korrekte Erfassung der Strahlungswärme) für den Wärmetransport sind in Fachbüchern oder auch allgemein zusammengefasst in Wikipedia nachlesbar. Darüber zu schreiben ist somit nicht erforderlich bzw. soll auf ein Minimum begrenzt bleiben.

Danach finden folgende vier Wärmeübertragungsvorgänge im Lu..po.Therm und an seinen Oberflächen statt:

Art	Bemerkung
Strahlungswärme	Strahlung geht ungehindert durch Vakuum und Luft
Wärmeleitung in Luft und Folien	durch Stoß-Energieübertragung zwischen Atomen
Konvektiver Wärmetransport	Luftbewegung transportiert „warme Atome"
Brown'sche Molekularbewegung	„aufgeheizte Moleküle tanzen" durch die Luft

Anmerkungen zu den einzelnen Vorgängen.

6.1. Strahlungswärme

Sie trifft auf die beiden Außen- bzw. Deckschichten von allen nahen oder entfernt liegenden Oberflächen mit deren Oberflächentemperatur im Bereich von etwa -20°C bis +50°C auf. Solare kurzwellige Wärmestrahlung trifft nicht, höchstens in Ausnahmefällen direkt auf das Material, sonst nur indirekt durch Aufwärmvorgänge als mittel- bis langwellige Wärmestrahlung.

Wenn Deckschichten von Verkleidungsmaterial vorliegen ist zu unterscheiden, ob sie am Lu..po.Therm direkt anliegen oder ob ein Luftspalt dazwischen ist. Wenn ein direkter Kontakt besteht, dann findet Wärmeleitung durch Übertragung vom außen benachbarten Material statt, sonst kommt Strahlungswärme darauf. Ein vollständiger Kontakt dürfte schwerlich über die gesamte Fläche wegen Unebenheiten möglich sein, sofern kein Anpressen oder leichtes Zusammendrücken beabsichtigt ist. Bei eingebautem Lu..po.Therm ist dann die Temperatur der benachbarten Oberflächen vom Einbauort maßgebend, die meist weniger stark differiert.

Innerhalb der einzelnen Luftpolsterkammern von den 8 Schichten findet auch ein Strahlungswärmetransport statt. Mit rd. 3,5 mm Dicke bzw. rd. 10 mm Länge besteht bei 1 Schicht genügend Platz, dass sich die Wärmestrahlung ausbreiten und einen Temperaturausgleich bewirken kann. Diese Infrarotstrahlung hat die Wellenlänge, wie sie von den umgebenden Oberflächentemperaturen abgegeben werden, sie liegt rd. bei einem 100- bis 1.000-stel der Abmessungen von den Luftpolsterkammern.

Der Eintrag von Strahlungswärme auf die Oberfläche ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit. Hier liegen obige Daten vor, wobei die Emissivität bei 0,149 außen und 0,165 innen liegt. Anders ausgedrückt, es werden rd. 85% der ankommenden Strahlungswärme reflektiert. Damit können nur rd. 15% der ankommenden Wärme von der ersten Schicht aufgenommen werden, die in der Regel sofort als Strahlungswärme wieder abgegeben wird: Absorption = Emission. Wenn zwischen den Materialseiten eine Temperaturdifferenz besteht, wird ein Teil der Wärme bis zur nächsten Widerstandsebene weiter transportiert.

Der Wärmetransport ins Innere wird an den drei OPP-Folien weiter gebremst, die bei freier Anordnung nur noch 5,1% der Strahlungswärme weiter leiten. Aus Sicht des Wärmetransportes durch Strahlung ist durch diese Kaskadenanordnung der metallisierten Folien eine nahezu vollständige Reduktion vorhanden. Wenn die OPP-Folien Kontakt mit dem wärmeleitenden Material der PE-HD-Folien haben, müssen diese Kontaktflächen davon abgezogen werden, siehe auch nachfolgender Punkt. Hier liegen keine Daten vor, es können näherungsweise Annahmen vorgenommen werden, um zu einer Einschätzung zu kommen.

6.2. Wärmeleitung in Luft und Folien

Die Wärmeleitung erfolgt

- nach innen durch aufgenommene Wärme aus dem nicht reflektierten Teil der Strahlungswärme in die Abdeckfolie,
- dann in die mehr oder weniger locker anliegenden Luftpolsterfolien,
- dann maximal jeweils durch Noppen kleinflächig über die trennenden OPP-Folien
- mit dreifacher Wiederholung bis hin zur Außenseite.

Alle Kontakte zwischen den einzelnen Folien sind kleinflächig bis punktförmig oder gar nicht vorhanden. Die innere Weglänge ist damit größer als die normale Materialdicke von 3 cm.

Maßgebend sind die Noppenstege mit ca. 3 mm Höhe, einem Umfang von ca. 5 cm/Noppe und einer Dicke von 0,015 mm. Sie sind oben und unten geschlossen (abgedeckelt). Die Hauptmasse aus PE- und PP-met-Folien des gesamten Folienpaketes ist in den parallelen Schichten angeordnet, nur ein kleiner Teil in den Noppenstegen.

Die Noppenstege bilden das Nadelöhr. Sie sind maßgebend für den geringen Wärmetransport infolge Wärmeleitung. Die Noppenbasis ist eine durchgängige Folie; zwei solcher Folien sind benachbart. Die Noppen berühren etwa 60% der Deck- und PP-Folienfläche, was nicht im Schnitt, sondern am besten im Original in der Draufsicht ersichtlich wird. Durch die fast flauschige Struktur liegen die Folien nicht „ordentlich" wie unten in der Prinzipskizze, sondern immer etwas verkanntet, verschoben und unterschiedlich dünnem Abstand aneinander.

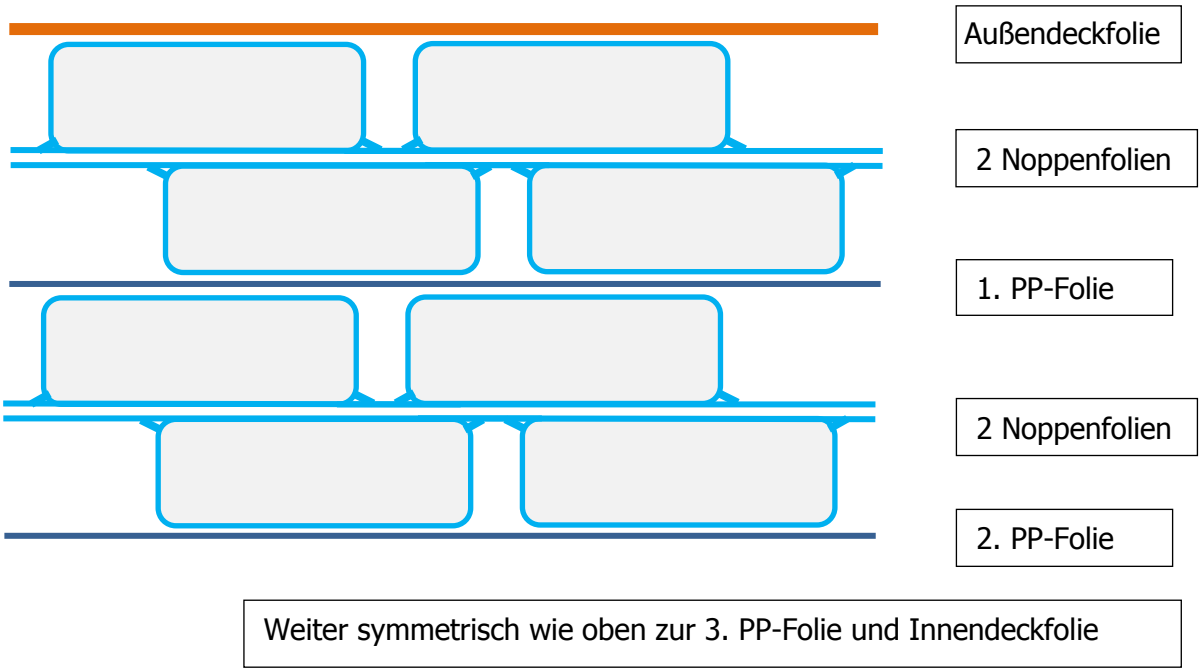

Abbildung 5: Prinzipskizze für die Anordnung der Folien

Die Wärmeleitung kann nur an den Berührungsstellen erfolgen, diese stellen eher die Ausnahme statt die Regel dar. Es kann angenommen werden, dass an jedem Querschnitt mindestens eine breitere Unterbrechung von mehreren Quadratzentimetern bis -dezimetern vorliegt, solange das gesamte Schichtenpaket nicht eingepresst, sondern locker eingebaut ist.

Die drei hochreflektierenden PP-Folien (je ~95%) und die reflektierende Innenschicht (~84%) vom gesamten Schichtenpaket können damit innerhalb der Schichtenanordnung als (mindestens) **eine** weitere komplett durchgehende reflektierende Schicht zur Innendeckfolie angesehen werden. Diese Aussage ist mit weiteren Untersuchungen zu untermauern. Sie hat aber eine große Bedeutung für den Fall, dass die Innenfolie von darauf liegenden Baustoffen großflächig berührt wird und damit außen ihre reflektierende Eigenschaft reduziert wird.

6.3. Konvektiver Wärmetransport, Brown`sche Molekularbewegung

Im Unterschied zur Strahlungswärme, die nicht an Masse gebunden ist, bei der Masse sogar hinderlich ist, ist bei der Wärmeleitung eine hohe, dichte Masse von Vorteil, damit auf kurzem Weg im festen oder flüssigen Verband von einem Atom zum benachbarten Atom Energie übertragen wird.

Luft hat eine etwa um den Faktor 0,0005 bis 0,001 geringere Masse als die meisten Baustoffe. Damit ist der Wärmetransport im Lu..po.Therm in ruhender Luft gegenüber der Wärmeleitung in seinen festen Bestandteilen fast vollständig vernachlässigbar.

Das wird auch nicht besser, wenn konvektiv bewegte Luft Wärme von der wärmeren Seite zur kälteren Seite tragen soll. Dazu sind die Volumina der Noppen oder deren Zwischenräume viel zu klein und die Luftwiderstände zwischen den einzelnen Schichten zu groß. Selbst wenn der Luftwiderstand sehr klein und die Spalten zwischen den einzelnen Schichten groß genug wären (abgesehen von einzelnen spezielle Fällen), wären die Temperaturdifferenzen zu klein, um durch deren Druckdifferenzen eine Konvektion zu ermöglichen.

Wie oben gezeigt wurde, ist selbst dann der Wärmetransport vom festen Material in die Luft und ebenso umgedreht sehr zeitaufwendig und mit hohen Luftgeschwindigkeiten verbunden.

Die weiter erwähnte Möglichkeit des Wärmetransportes durch Brown`sche Molekularbewegung ist noch ineffektiver als der eingangs beschriebene Übertragungsweg von Atom zu Atom. Der Transport durch die Eigenbewegung der „erhitzten" Moleküle findet stochastisch im Luftraum statt, um dann beim Auftreffen auf eine kühlere Oberfläche seine Energie abzugeben, ehe es wieder davon weg fliegt.

7. Berechnung des Wärmetransports

7.1. Berechnungsannahmen

Aus der bisherigen Darstellung ergeben sich folgende Fakten für den Wärmetransport:

1) Wärmetransport durch Konvektion und Brown`sche Molekularbewegung kann vernachlässigt werden.
2) Wärmeeintrag in die Deckschichten erfolgt hauptsächlich durch Strahlungswärme.
3) Durch eine hohe Reflektion der inneren/äußeren Deckschicht wird der Wärmeeintrag um rd. 85% reduziert. Das kann der Wirkung wie einer gleich großen Wärmedämmung gleich gesetzt werden.
4) Durch eine geschickt angeordnete Folge von Luftpolsterfolien und von innen geschützt gelagerten sowie noch höher reflektierenden metallisierten Folien, wird der Wärmetransport verzögert, mehrfach unterbrochen und der Weg verlängert.
5) Die maßgebliche Reduktion der Wärmeleitung erfolgt durch die extrem minimierte Masse der Noppenstege für den Wärmetransport auf 0,56% vom gesamten Querschnitt bzw. 56 cm²/m² Schichtfläche.
6) Zur reduzierenden „dämmenden" Wirkung durch IR-Reflektion kommt der extrem reduzierte Übertragungsquerschnitt hinzu.

Es ergibt sich daraus folgender Wirkmechanismus, im Wesentlichen nur Strahlungswärme, die jeweils auf ein Minimum reduziert wurden:

(1) Durch Reflektion werden davon ca. 85% eliminiert.
Dies wirkt wie eine sehr gute Dämmung.

(2) Die verbleibenden max. 15% der Wärmeabsorption gehen teilweise wieder als Strahlungswärme in den Raum zurück – dieser Anteil wird nicht berücksichtigt. Damit geht der restliche Anteil durch Wärmeleitung in den Wärmereflexionsstoff hinein:
a) der Luft innerhalb und zwischen den Noppen – Luft leitet schlecht,
b) den Noppenstegen – diese betragen nur 0,56% von der Durchgangsfläche.
Die gut isolierende Luft und die minimale Noppenstegfläche lassen somit nur noch einen Bruchteil der ankommenden Wärmeenergie durch.

Mit dieser Ausgangssituation wird in der nachfolgenden Excel-Tabelle der Wärmedurchgang durch Lu..po.Therm sowie der äquivalente Wärmeleitwert $\lambda_{äqi}$ und daraus die Kennwerte Wärmedurchgangswiderstand $R_{äqi}$ sowie eine auf einen Vergleichsdämmstoff mit der Wärmeleitgruppe WLG 040 bezogene äquivalente Dämmdicke berechnet.

7.2. Ergebnisse

Aus der nachfolgenden Excel-Tabelle können die Ergebnisse für Strahlungswärme für 30 mm Lu..po.Therm entnommen werden zu

- Wärmeleitzahl $\lambda_{äqi}$ = 0,002 W/(m·K)
- Wärmedurchgangswiderstand $R_{äqi}$ = 14,71 m²K/W
- Wärmedurchgangskoeffizient $U_{äqi}$ = 0,068 W/(m²·K)
- Vergleichswärmedämmdicke $d_{äqi}$ = 0,59 m für WLG 040

Alle Werte sind als äquivalente Kennwerte zu verstehen.

Einschränkungen können sich ergeben,

(1) wenn sich die Reflexion der äußeren Deckschicht verringert.
Schlimmstenfalls wird die Oberfläche so verschmutzt, dass sie wie ein grauer Strahler mit Eigenschaften der üblichen Baustoffe (Putz, Beton usw.) reflektiert.

(2) wenn keine völlig durchgängige freie Luftschicht über dem Material ansteht.
Damit wird in dem Maße der Strahlungswärmeeintrag verringert wie die Berührungsfläche zunimmt.
Berührungsflächen liegen z.B. vor durch
a) An-/Aufliegen von Lu..po.Therm bei der Wandverkleidung
b) punktförmige Durchdringung durch Befestigung an der Wand oder der Decke.
Diese können durch Plasteummantelung bei Schrauben noch weiter verringert werden und sind damit kaum noch maßgebend.
c) Befestigung zwischen kreuzweise verlegten Latten an Wandflächen oder im Fußboden mit Lattenbreite. Durch entsprechende statisch sicher wirkende Abstandshalter kann ein linienförmiges Aufliegen auf punktförmige kleine Aufstandsflächen reduziert werden.
Die Berührungsflächen können dann auf wenige cm²/m² minimiert werden

(3) wenn die Raumluft am Lu..po.Therm konvektieren kann **und** wärmer ist als die Oberfläche von Lu..po.Therm.
Damit entstehen Bedingungen wie sie im Versuchsaufbau von Fraunhofer durch konvektiven Wärmeeintrag vorliegen und in Pkt. 4.6 beschrieben wurden.
Dieser Fall ist vermeidbar, wenn einfach nur mit Sorgfalt und Verstand die Planung und Ausführung vorgenommen wird.

(4) wenn Lu..po.Therm-Bahnen überlappt werden.
Die Überlappungen sind ein- oder beidseitig mit gleichermaßen gut reflektierendem Klebeband zu verkleben. Damit entfällt dieser Punkt.

Die vorgenannten, nachteiligen Einschränkungen können abgeschätzt werden und mit einem Sicherheitsbeiwert in der Berechnung berücksichtigt werden.

Es ist aber auch davon auszugehen, dass das Ergebnis nicht schlechter wird, sondern sogar noch besser wird:

(5) In der Berechnung wurden die 3 hoch reflektierenden Zwischenlagen völlig vernachlässigt. Damit liegt eine noch bis dreifache Reflektion im Schichtenaufbau vor. Eine äußere Verschmutzung hat dann eine geringere bis keine nachteilige Auswirkung.
Jede Zwischenlage reflektiert zu 95% die Strahlungswärme zurück. Wenn durch die innere Deckschicht noch 15% der Wärme nach innen geht, sich dort aber nur 5% an der jeder Zwischenlage in Wärme umformt, dann geht ein 2facher, größerer Anteil Strahlungswärme wieder an die außen liegende Deckschicht zurück als in die nächste Innenschichtlagen. Dieser Vorgang geht letztlich auf einen nicht mehr beachtenswerten Anteil zurück. Die gleiche Herangehensweise mit ähnlichen Schichtenpaketen wird in der Weltraumtechnik seit langem mit vollem Erfolg unter wesentlich härteren Umgebungsbedingungen angewandt.

(6) Die Zwischenlagen liegen alle lose aneinander, wenn sie vertikal hängen oder unter einer Decke hängend angeordnet sind. Damit kann die geforderte freie Luftschicht wieder als vorhanden angesetzt werden. Zweckmäßig können bei Verkleidungen eine bewusst unebene Oberfläche bzw. absichtlich eingebaute Abstandshalter oder Distanzpunkte diese Luftschicht bewirken. Diese Luftschicht braucht nur 1/10tel Millimeter dick sein, um zu wirken. Sie kann z.B. bei Wänden konstruktiv rd. 5 bis 10 mm dick vorgesehen werden, um Toleranzen auszugleichen.

#	Bezeichnung	Wert	Dim.	Formel		Bemerkung		Dateneingabe	
1. Kenndaten Lupotherm								berechnete Werte	
	Gewicht	430	g/m²						
	Dicke	30	mm						
	Rohdichte	14,3	kg/m³	Z(-2)S/Z(-1)S*100*0,01					
	Anzahl Schichten	8	--						
	Reflektion außen	0,165	--			Thermrem, Datei: LUPO_8_CFD_Simulation.ppt			
	davon Wärmeabstrahlung	0,500	--						
	result. Reflexion	0,083	--						
	Reflektion innen	0,050	--			wird nicht weiter berücksichtigt			
	Wärmeleitung Luft	0,024	W/(mK)						
	Wärmeleitung HD-PE	0,220	W/(mK)						
2. Abschätzung der Noppenstegfläche									
	Noppenanzahl	10	n				1 cm²	100	mm²
	dazugehörige Länge	148	mm				1 dm²	100	cm²
	Noppenabstand	14,8	mm	Z(-1)S/Z(-2)S			1 m²	100	dm²
	Anzahl Noppen / m	67,6	n/m	Z(-3)S/Z(-2)S*100			1 m²	1E+06	mm²
	Anzahl Noppen / m²	4.565	n/m²	Z(-1)S^2					
	Noppensteg Umfang	56	mm						
	Noppenstegdicke	0,015	mm						
	Noppenstegfläche	0,84	mm²	Z(-2)S*Z(-1)S					
	ges. Noppenstegfläche	0,0038	m²/m²	Z(-4)S*Z(-1)S*10^-4		= 0,38%	38,3	cm²/m²	
3. Innere Weglänge für Leitung in Schichtmaterial									
	Gesamtdicke	30,0	mm	Z(-16)S		= Dicke einer Schichtlage			
	Noppenhöhe	3,75	mm	Z(-1)S/8					3,75
	mittlerer Noppenabstand	14,80	mm	Z(-11)S					
	im Mittel horiz. Weglänge	7,40	mm	Z(-1)S*0,5				7,40	
	innen horiz. Schichten	7	stck			tatsächl. doppelt vorhanden			
	äußere Schichten	2	stck						
	ges. horiz. Länge	0,067	m	(Z(-1)S+Z(-2)S)*Z(-3)S*0,001					
	ges. Weglänge	**0,097**	m	Z(-7)S*0,001+Z(-1)S					
4. Weglänge für Wärmeleitung in Luft durch die bzw. zwischen den Noppen									
	Schicht	mm	anz	mm	Dichte		kg/m²		
	außen	0,100	2	0,20	ZS(-1)*ZS(-2)		0,92	0,18	ZS(-1)*ZS(-4)
	innen hd-pe	0,015	12	0,18	ZS(-1)*Z(-17)S(-2)		0,92	0,17	ZS(-1)*ZS(-4)
	alu-bedampft-opp	0,020	3	0,06	ZS(-1)*ZS(-2)		1,00	0,06	ZS(-1)*ZS(-4)
	ges. Materialdicke			0,44	SUMME(Z(-3)S:Z(-1)S)			0,41	SUMME(Z(-3)S:Z(-1)S)
	Luftschichtdicke			**29,56**	Z(-15)S(-2)-Z(-1)S				

Fortsetzung der Tabelle von voriger Seite									
#	Bezeichnung	Wert	Dim.	Formel		Bemerkung			
5. Wärmedurchgang - Leitung		Dicke	lampda	Reflekt.	Leitg.	U			
		m	W/(mK)	--	--	W/(m²K)			
	Luft	0,0296	0,0242	0,083	0,996	0,067	ZS(-3)*ZS(-2)*ZS(-1)/ZS(-4)		
	Schichten	0,0966	0,2200	0,083	0,004	0,001	ZS(-3)*ZS(-2)*ZS(-1)/ZS(-4)		
						0,068	SUMME(Z(-2)S:Z(-1)S)		
äqui.Wärmeleitwert Lupoth.		**0,0020**	W/(mK)	Z(-2)S(4)*Z(-43)S*0,001			bei Dicke von 3 cm		
	ohne Reflektion	0,0247	W/(mK)	Z(-1)S/Z(-4)S(2)			muss größer als von Luft sein		
	Widerstand R	**14,71**	m²K/W	1/Z(-4)S(4)					
Vergleichsdämmung mit		0,040	W/(mK)						
	Vergleichsdicke	**0,59**	m	Z(-1)S*Z(-2)S					
6. Speicherfähigkeit									
	Polyethylen	920	kg/m³						
		2300	J/(kgK)				1 J = 1 W/s		
		ρ	c	ρc					
		kg/m³	W/(kgK)	W/(m³K)					
	Polyethylen	13,0	0,64	8,31	ZS(-2)*ZS(-1)				
	Luft	1,26	0,28	0,35	ZS(-2)*ZS(-1)				
	Lupotherm	14,3	**0,61**	8,66	SUMME(Z(-2)S:Z(-1)S)				
7. Wärmebeharrung									
		Lupoth.				Vergleich	Luft	Holz	Stein
	Dichte	14,3	kg/m³	Z(-4)S			1,26	600	1.800
	lampda	0,0020	W/(mK)	Z(-18)S			0,0242	0,13	1,2
	Speicherfähigkeit	0,61	Wh/(kgK)	Z(-6)S(1)			0,28	0,57	0,24
	B = $(\rho\lambda c)^{0,5}$ =	**0,1**	$Wh^{0,5}/(m^2K)$	(Z(-3)S*Z(-2)S*Z(-1)S)^0,5			0,09	6,7	23

Unter Beachtung der vorgenannten Aspekte sind die vorgenannten Ergebnisse zu verifizieren:

- Es wird nicht, wie aufgezeigt, ein noch besseres Ergebnis avisiert.
- Es wird vielmehr eine gewisse nachteilige Toleranz akzeptiert.
- Als Zielwert wird eine Vergleichsdicke mit Dämmmaterial WLG 040 von 40 cm angesetzt oder die errechnete Vergleichsdicke von 59 cm wird nur zu 2/3, also 66% angesetzt.

Damit ergeben sich folgende Werte:

- Wärmeleitzahl $\lambda_{äqi}$ = 0,003 W/(m·K)
- Wärmedurchgangswiderstand $R_{äqi}$ = 10,0 m²K/W
- Wärmedurchgangskoeffizient $U_{äqi}$ = 0,10 W/(m²·K).

8. Literatur

NORMAPME — Interessenvertretung der KMU – im Auftrag der Europäischen Kommission, mit Vetorecht bei EOTA und CEN in Brüssel u.v.m.

Fraunhofer12 — WUFI® Update-Seminar 2012: Strahlung, Verschattung und Oberflächenübergang. Fraunhofer IBP

Hauser&al09 — Hauser G., Schade A.; Sinnesbichler: Potentiale und Grenzen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien. IBP-Mitteilung 495, 36 (2009) Neue Forschungsergebnisse, kurz gefasst.

Hauser&al11 — Hauser Gerd, Kersken Matthias, Schade Almuth, Sinnesbichler Herbert: Experimentelle und theoretische Untersuchungen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien. Sonderdruck aus Bauphysik 33 (2011), Heft 1, Seite 33-42, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co KG

Hejhálek — Hejhálek Jiří: Mehrschichtige Wärmeisolierung mit IR-Reflexionsfolien. Worddokument von LPS GmbH

Hillemacher05 — Hillemacher B.: Berechnungen zur Wärmeübertragung durch Strahlung unter Einsatz der Verbundwärmedämm-Matte „Aluthermo Quattro". WLiK Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Im Auftrag der Fa. Aluthermo AG, Burg Reuland, Belgien

Hintz&al12 — Hintz B., Pöllmann H., Krcmar W.: Reduktion von Wärmestrahlungsverlusten in Hochlochziegeln – Ein neuer Konzept zur wärmetechnischen Altbausanierung. B + B Forum, Energetische Fassadensanierung

Jung07 — Jung Wilfried J.: Technische Daten und Gegenüberstellung der Vergleichsmessung von SFIRMM, TRADA und IBP zu Lu..po.Therm

Jung12 — Jung Wilfried J. mit Bericht von Meier Claus: Die Wärmeleistung der Strahlungsheiztechnik

Kearley07 — Kearley Vic: Multifoil testing at TRADA. TRADA Technology

König07 — König Norbert: Thermal insulation with IR-reflective multifoil products – on overview. Head of Department New Building Materials + Components. Normapme Conference 16.04.2007, Stuttgart

Künzel&al07 — Künzel Hartwig M., Sedlbauer Klaus: Klarstellung zur bauphysikalischen Wirkung Infrarot reflektierender Schichten. IBP-Mitteilung 479, 34 (2007) Neue Forschungsergebnisse, kurz gefasst.

Riedl — Riedl Wolfgang: Lu..po.Therm B2+8 Strukturmodell für CFD-Simulation. THERMREN GmbH, Münchner Technologiezentrum Agnes-Pockels-Bogen 1, 80992 München

SFIRMM07 — sfirmm: For the promotion of thin reflective multifoil products and for the creation of an European certification applied to these products. syndicat des fabricants d'isolants reflecteurs minces multicouches

Ingenieurbüro Dr.-Ing. W. HORN

Energieeffizienz-Lüftung-Strahlenschutz

Bauwerksplanung und Begutachtung

Gesundes Wohnen = Wohlfühlklima mit Strahlungswärme, Feuchteschutz, hygienische-mindest-Lüftung, Schadstoff- und Energieminimierung

Sachverständiger für Schutz vor Radon
und bautechnischen Strahlenschutz

Gutachten

zur thermischen Isolierleistung von

LupoTherm *LPT-17*

Material, Bezeichnung

LupoTherm *LPT-17*, Nenndicke 32 mm

Aufgabe

Für das rundum verbundene Schichtenpaket mit 9 Reflexions- und 8 Luftpolsterfolien ist der U-Wert zu ermitteln.

Ergebnis

Auf Basis empirischer Messungen und statistischer Auswertung ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient für Strahlungswärme von

U-Wert = 0,0055 W/(m²K)

Auftraggeber
LupoTherm GmbH
A-5144 Handenberg, Gewerbering 1

Bearbeiter

Dr.-Ing. Wolfgang Horn

Köhra, 10.03.2023

1. Inhalt

1. Inhalt....2
2. Veranlassung....2
3. Zusammenfassung....3
4. Lösungswege zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten....4
   4.1. Beispielobjekte und Praxiserfahrungen....4
   4.2. Mathematisch-physikalische Lösungen....4
   4.3. Messungen....5
5. Messungsdurchführung, -anordnung....7
6. Messergebnisse....9
7. Wärmekennwerte....11
   7.1. Wärmedurchgangskoeffizient U....11
   7.2. Wärmedurchgangswiderstand R....12
   7.3. Wärmeleitzahl λ....12
   7.4. Vergleichswärmedämmdicke....12
8. Literatur....13

2. Veranlassung

Für die Bestimmung des konduktiven Wärmedurchgangs durch Baustoffe wird derzeit allgemein nur die Wärmeleitfähigkeit im „fiktiven und stationären Beharrungszustand" gemessen.

Bei reflektierenden und sehr dünnen Dämmstoffen wird primär ein großer Anteil von Wärmestrahlung sofort reflektiert und braucht bzw. kann nicht mehr gedämmt werden. Sekundär geht durch die vielen dünnen Folien der nicht reflektierte = absorbierte Wärmeanteil mit zeitlicher Verzögerung hindurch.

Für vielfach radiativ und konduktiv wechselwirkende Schichtenkombinationen ist zur Bestimmung des Wärmedurchgangs mit ausschließlich Strahlungswärmeeintrag kein adäquates Berechnungs- oder Messverfahren bekannt Hierzu liegt eine adäquate Entwicklung vom IB Horn seit dem Jahr 2013 vor. Auf die Problematik der Aussagekraft von Wärmekennwerten wird in [Blum&19] und [Fleisch19] erstmals 2019 ausführlicher eingegangen, zu sehr dominieren in der Praxis die Vorgaben von Normen, was gravierende Fehlbewertungen und letztlich Verluste von Volksvermögen bedeutet.

Die a.R.d.T. entwickeln sich „lautlos" weiter. (Seite 57) Sie sind dem vorgebildeten Techniker durchweg bekannt (S. 56) … Sie sind der Mindeststandard, dem die Werkleistung des Unternehmers entsprechen muss, wenn keine andere Vereinbarung getroffen ist. …. Der Stand der Technik ist hingegen ein fortschrittlicherer Entwicklungsstand. Er ist erreicht, wenn die

Wirksamkeit fortschrittlicher, vergleichbarer Verfahren in der Betriebspraxis zuverlässig nachgewiesen werden kann, ***wofür bereits experimentelle Tests ausreichen****. Anders, als bei den a.R.d.T., ist eine Bewährung in der betrieblichen Praxis über einen längeren Zeitraum aber nicht erforderlich.* [Karczewski19] (Hervorhebung Ho)

3. Zusammenfassung

Für den Wärme-Reflexions-Stoff LupoTherm ***LPT-17*** wurde der AN beauftragt, den für den Wärmeschutznachweis erforderlichen Wärmedurchgangskoeffizient U zu bestimmen. Grundlage dazu waren mehrjährige Erfahrungen bei der U-Wert-Bestimmung und des Praxiseinsatzes von vielfach reflektierenden Materialien.

Die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten ist u. a. wie folgt möglich:

1) Aus Beispielprojekten und Praxiserfahrungen mit Verbrauchsmessungen
2) Mathematisch-physikalische Ableitung auf Basis von Materialkenndaten
3) Versuchsdurchführung von Wärmestrahlung und Messung der reduzierten Strahlungstemperatur.

Es wurde auf Grund der positiven Praxiserfahrungen der dritte Weg gewählt.

Mittels Wärmeleitzahl λ und infolge Luft als diathermischer Stoff für Wärmestrahlung wird der Wärmedurchgangskoeffizient und eine äquivalente Vergleichswärmedämmdicke ermittelt. Dazu wurden Wärmedurchgangswerte über einen Temperaturbereich bis 100 K erfasst. Die Ergebnisse lassen in Anbetracht der praktischen Streuungsbreiten von Wärmemesswerten einen sehr guten Zusammenhang erkennen.

Folgende **Kennwerte** sind ermittelt worden:

1	**Wärmeleitzahl**	**λ**	**=**	**0,000.072**	**W/(mK)**	
2	**Wärmedurchgangswiderstand**	**R**	**=**	**182**	**m²K/W**	
3	**Wärmedurchgangskoeffizient**	**U**	**=**	**0,0055**	**W/(m²K)**	
4	**Vergleichswärmedämmdicke**	**d**	**=**	**5,82**	**m**	für WLG 032

Diese Mess- und Rechenwerte

a) können durch Einbau- und Nutzungsbedingungen beeinflusst werden,
b) gelten ausschließlich für vorherrschende Strahlungswärme mit wärmeren Oberflächen und Gegenständen mit dazu vergleichsweise niedrigerer Raumlufttemperatur,
c) ohne maßgebliche bzw. raumgreifende Konvektion,
d) sind nicht übertragbar auf ähnliche Kompositmaterialien.

Für das Gutachten wurde gemäß den Praxisanforderungen und den physikalischen Vorkenntnissen des Autors bestmögliche Sorgfalt zugrunde gelegt.

Hinweise zu Verbesserungen und Weiterentwicklungen sind gern willkommen.

αRa Ingenieurbüro Dr.-Ing. W. Horn, Gartenstraße 48, 04683 Köhra
Tel. 034293-471406 • Funktel. 0172-3712892 • info@alphara.de

4. Lösungswege zur Bestimmung des Wärmedurchgangs-koeffizienten

Kurzform für Wärmedurchgangskoeffizienten nachfolgend U-Wert, in W/(m²K)

Im Vordergrund steht die Aussagekraft zur Temperaturbarriere bzw. der Nutzen des U-Wertes im Bauwesen für die Anwendung in der Praxis. Er wird u.a. charakterisiert durch Qualität, Genauigkeit und Sicherheit. Er muss bestimmte Anforderungen erfüllen wie Reproduzierbarkeit, minimale Fehleranfälligkeit, großer Wertebereich.
Wie der U-Wert bestimmt wird, ist zweitrangig, aber die normative Prämisse der Naturgesetzlichkeit ist obligatorisch.

Man kann folgende drei Lösungswege ansetzen.

1.1. Beispielobjekte und Praxiserfahrungen

Bewohnte Objekte wie sanierte Gebäude, am besten Denkmale, haben in der Praxis für die Bauherrschaft die „überzeugendste" Wirkung. Sie wirken dann am besten, wenn es große Gebäude sind. Leider sind kleine Objekte viel „problematischer" und sie sind leicht manipulierbar, ohne dass es auffällt. Standort, Material und Zeitraum spielen im Unterbewusstsein eine größere Rolle als oft angenommen wird. Beispiele s. [Horn12]
Aus diesen Gründen, den hohen Kosten und der längeren Bau- und Prüfzeit wird dieser Weg nachrangig betrachtet, um psychologische Faktoren bewusst zu mindern. Diese Methode ist dann der Gradmesser, wenn sich in realisierten Objekten die Wirksamkeit des Wärmeschutzes durch Vielfachreflexion mit einem sehr niedrigen U-Wert bestätigt. [Jung21; Kampfert]

1.2. Mathematisch-physikalische Lösungen

Dieser Lösungsweg ist besonders bei Physikern und Mathematikern naheliegend. Er gilt als exakt und höchst anspruchsvoll. Mit ihm kann man alles „erschlagen". Als Beispiel kann man mit großem Respekt auf die Vorhersagen vor 100 Jahren von Albert Einstein auf seine theoretisch vorhergesagten Gravitationswellen hinweisen, die erst in den letzten Jahren nachgewiesen wurden.

In gehöriger Distanz zu den Gravitationswellen kann man auf das „bisschen Wärme mit den 3 naturgesetzlichen Übertragungswegen" verweisen. Jedoch ist es erforderlich, auch hier vorsichtig mit Formeln umzugehen. Als Beispiel sei erwähnt, wie unvollständig Einflussfaktoren beim Wärmetransport (ohne Beachtung der Masse ρ und der spezifischen Wärmekapazität c (zusammengefasst als Wärmeeindringkoeffizient b) bzw. wie man in [Volland14] die Wärmeübertragung in Luftschichten ermittelt:

$\lambda_{Luft} = \lambda_L + \lambda_S + \lambda_K$ in $W/(m \cdot K)$

λ_L – Leitung = molekulare Wärmeübertragung,

λ_S – Wärmeübertragung durch Strahlung und

λ_K – Wärmeübertragung durch Konvektion.

Diese Darstellung mit einem längenabhängigen Strahlungsfaktor zieht sich durch mehrere Auflagen und Jahre hindurch. Das lässt die Vermutung aufkommen, dass man u.a. mit λ_S nicht viel anzufangen weiß bzw. dass es Bauingenieure nicht bemerken brauchen, denn sie haben ja eine entsprechende DIN- oder EN-Norm zur Hand. Und Niemand bemerkt es oder reagiert darauf, wozu auch?

[Baehr&2019] gehen auf über 800 Seiten ausführlich auf die Wärme- und Stoffübertragung ein. Darin wird durchgängig mit umfangreichen Herleitungen mit insbesondere Differentialgleichungen (auch Differenzenverfahren, Finite-Element-Methode) ein für Bauingenieure auf dem Wärmesektor bzw. Energieberater sehr hohes Niveau vorgestellt und so gut wie alles gelöst. Dabei sollen zwei kritische Anmerkungen erlaubt sein:

Selbst wenn explizit nicht Schwankungsbreiten, sondern nur Mittelwerte (Tages- statt Stundenwerte bzw. Jahres- statt Monatswerte) von Einflussfaktoren interessieren, sind diese u.a. wegen Nichtlinearität nicht einfach zu bestimmen, [ebenda S. 371]. Das trifft auch beim Wärmedurchgang zu. Beim Wärmeübergang von der Körperoberfläche nach außen wie zur Luft wirken die Körperformen auf den Strömungsverlauf so vielgestaltig, dass man nur mit aussagekräftigen Messdaten auf einen funktionalen Zusammenhang schließen kann. [ebenda S. 379].

Nach H. Föll (aus Internet) gibt es keine einfachen Lösungen von Differentialgleichungen. Sie können mit ihren Annahmen vereinfacht werden, was sich nicht nachteilig auswirken muss,

was eine bessere Anschaulichkeit erlaubt, sie können die Berechnung vereinfachen und noch genügend genau sein.
Die beiden Anmerkungen sind keineswegs abwertend zu sehen, sondern sollen überleiten zur Lösung des U-Wert-Problems durch Messungen.

1.3. Messungen

Messungen des Wärmedurchgangs und die Ermittlung der Wärmeleitzahl bzw. in Folge der Wärmedurchgangswiderstand und des Wärmedurchgangskoeffizient werden standardmäßig in mehreren Einrichtungen (Labors, Unis, DIBT mit akkreditierten Prüflabors) im In- und Ausland vorgenommen. Es sollen jedoch immer recht dicke Proben möglichst entsprechend ihres Einsatzes in der Praxis sein. Sonst können Fehlereinflüsse wie durch Austrocknungsvorgänge beim Wärmeeintrag dominieren, wenn der Feuchteeinfluss untersucht werden soll. Um das zu vermeiden bzw. zu mindern oder bestmöglich zu korrigieren, werden Zuschlagswerte berücksichtigt. Sie sollen die natürlichen Bedingungen erfassen, was jedoch nur unzureichend und realitätsfern erfolgt.

Die Wärmeübertragung in der Prüfkammer (Hot-Box) erfolgt immer konvektiv mit warmer Luft. Anfragen an Prüfeinrichtungen für nur Strahlungswärmeeintrag wurden negativ beantwortet. Entsprechende Prüfanordnungen wurden gesucht, jedoch nicht gefunden. Es darf davon ausgegangen werden, dass es dazu noch nichts gab/gibt.

Der Autor hat für sehr dünne (bis unter 0,1 mm dick) und auch für ein- und mehrlagige Bahnen bzw. Folienisolierungen eine Mess- und Auswertemethode entwickelt. [Horn13] Damit lässt sich über einen Temperaturbereich bis sogar weit über 200 K Abstrahltemperaturdifferenz der Verlauf und Temperaturzunahme ermitteln. Es konnte immer ein kontinuierlicher Verlauf ohne z.B. singuläre Besonderheiten festgestellt werden.

Anmerkung: Meine berufliche Tätigkeit wurde und wird noch heute geprägt mit Planen, Messen und Auswerten von Versuchen. Das begann ganz intensiv mit meiner Promotion als Forschungsstudent, war dann ein ständiges Thema bei der Entwickelung von Prüfmethoden zum Schutz vor Radon und ist wieder hochaktuell bei der effizienten Anwendung von Strahlungswärme. Umfangreiche Datenmengen mussten bei der Ermittlung der Betonfestigkeit mit zerstörungsfreien Prüfmethoden mit u.a. Faktorenanalyse bewältigt werden. Das war schon in den 1960iger Jahren nur mit EDV machbar, ist heute keine Besonderheit mehr. Damals konnte u.a. ermittelt werden, wie groß der Fehler der zerstörenden Druckfestigkeitsprüfung von 81 paarweise unterschiedliche Betonsorten ist. Deren Fehleranteil wurde bisher immer zum Nachteil den zerstörungsfreien Prüfmethoden wie mit Ultraschall angelastet.

Dazu sind möglichst viele Einzelwerte erforderlich. Die Datenmengen können schnell schwer beherrschbare Größen erreichen. Wie sich herausstellte, kann sowohl durch Planung von Versuchen wie mit [Lindner69] beträchtlich an Zeit und Materialaufwand gespart werden. **Bisher übliche Prüfmethoden, mit dem stationären und fiktiven Beharrungszustand, sind vom aktuellen Stand der Technik längst überholt und genauere Ergebnisse sind mit dynamischen Messungen wesentlich sicherer und aussagekräftiger zu erwarten.** Weiterhin sind zu beachten

- Reproduzierbarkeit	Die Messanordnung erweist sich als einfach und unterliegt realitätsnahen Prüfbedingungen, Unterbrechungen stören nicht.
- Schnelligkeit, Messdauer	Infolge der sehr geringen Masse wird die Probe schnell aufgewärmt bzw. kühlt auch wieder schnell runter. Die Wärmequelle kann dagegen träge sein.
- Robustheit	Es handelt sich um eine robuste Versuchsanordnung.
- Geräteeinsatz, Kosten	Die Messgeräte können sehr hochwertig sein, es reichen auch einfache handelsübliche Messgeräte aus.

Neben diesen drei Lösungswegen sind immer noch weitere Aspekte zu beachten und Mischformen möglich. Wie sich unten in Abschnitt 6 zeigt, ist das nach Meinung des Autors nicht mehr maßgebend. Die Ergebnisse zeigen, dass die Nutzungserwartungen voll erfüllt werden und im Vergleich mit anderen bautechnischen Kennwerten für die Praxis der Energieeinsparung völlig ausreichend und als sehr präzise bewertet werden können.

5. Messungsdurchführung, -anordnung

Die Messung des Wärmeflusses durch einzelne oder mehrere miteinander verbundene Materialien erfolgt üblicherweise mit einer Hot-Box. Der Wärmeeintrag in das zu untersuchende Material erfolgt vornehmlich durch Konvektion erwärmter Luft. Die Luft ist also wärmer als das Probenmaterial und wärmer als die dahinter befindliche Luft der zweiten Hot-Box-Kammer. Bis zum Erreichen des Gleichgewichts = Beharrungszustand erfolgt keinerlei Messung, egal wie viel Energie dafür aufgewendet wird und egal wie lange dieser Zeitaufwand dauert. Alleine daraus, dass bei jedem zu prüfenden Dämmstoff unterschiedlich viel Energie und Zeit vor Erreichen des Beharrungszustandes aufgewendet werden muss, ergibt sich eine signifikante Unverhältnismäßigkeit / Diskriminierung in den bisher zertifizierten Dämmstoffergebnissen. Außerdem muss beachtet werden, dass Strahlungswärme im infraroten Bereich die Messung beeinflusst, was aber gegenwärtig nicht berücksichtigt wird. Der Feuchtegehalt des Probematerials ist definiert, die Temperaturen und die Luftfeuchte in der Hot-Box auch. Diese Werte werden jedoch mit der Praxis extrem selten übereinstimmen und es ist immer zu beachten, dass in der Praxis langsame, schnellere und nahezu plötzliche Prozesse stattfin-

den, die nicht nur Wärme durch Wärmeleitung, sondern auch Feuchte zuführen oder abgeben.

Selbst in einem Dämmmaterial mit kleinen Poren findet permanent Wärmeleitung statt. In den Poren findet auch Wärmestrahlung statt. Wärmestrahlung ist generell vorhanden und dominiert in der Natur zu 95% Strahlungsanteil bei Hohlraumstrahlung [Meier07]. Außer am absoluten Nullpunkt gibt jeder Körper permanent Wärmestrahlung ab. Die bisherige Prüfmethode zur Wärmeleitung ist streng genommen nur eine sehr grobe und physikalisch unvollständige Messung, die den Anschein erwecken soll, die Wärmeleitung korrekt zu bestimmen. Der Aspekt des Wärmetransportes durch Strahlungswärme und die weiterhin stattfindenden Prozesse der INFRAROT-Reflexion und des Wärmetransportes durch Wasserdampf infolge des Dampfdruckgefälles bis hin zu Phasenwechsel von Wasserdampf in Wasser und umgedreht bleiben unberücksichtigt.

Wenn der Wärmeeintrag in Baustoffe durch fehlende Konvektion entfällt und die Oberfläche wärmer ist als die davor befindliche Luft, sollte gemäß üblicher Betrachtungsweise keine Wärme auf der Oberfläche ankommen und in das Material eindringen können. Wegen des Dampfdruckgefälles von der warmen Oberfläche des Probenmaterials zur innen kühleren Luft kann auch kein Wasserdampf mit seiner darin gespeicherten Energie in das Material eindringen. Ganz wichtig: **Das Material wird und bleibt trocken.** Die warme Oberfläche bildet und wirkt wie eine **thermische Feuchtesperre**.

Jetzt ist nur noch die Strahlungswärme zu berücksichtigen, die von allen umgebenden Körpern abgegeben wird. Hier finden folgende Vorgänge statt:

Strahlungswärme von wärmeren und kälteren Flächen trifft auf der Oberfläche des Prüfmaterials auf und wird teilweise reflektiert und teilweise absorbiert.
Messungen allein zum Reflexionsgrad können über den gesamten betreffenden Wellenlängenbereich vorgenommen werden, sind aber nicht erforderlich.

Der nicht reflektierte (absorbierte) Anteil erwärmt die Oberfläche.
a) Durch das entstehende Temperaturgefälle beginnt ein Wärmefluss zur kalten Seite.
b) Die wärmere Oberfläche selbst strahlt zusätzlich zum reflektierten Teil Wärme zurück.

Auf der kalten Seite des Materials erwärmt es sich stark verzögert ebenfalls, beginnt damit auch gleichzeitig Wärme in den Raum dahinter überwiegend durch Strahlung abzugeben.

Es stellt sich bei möglichst konstanten Bedingungen nach einer Einschwingzeit ein stabiler Zustand ein, wobei die Oberflächentemperatur auf der abgewandten Seite des Prüfmaterials etwas höher als vorher ist.

Weiter wird davon ausgegangen, dass andere Formen des Wärmetransportes wie durch Konvektion und Phasenwechsel nicht stattfinden bzw. keine maßgebliche Rolle spielen. Weitere Transportprozesse wie Einflüsse von Brownscher Molekularbewegung sind vernachlässigbar.

Die eben genannten Vorgänge sind äußerst komplex und können nicht mit nur dem Wärmeleitwert λ mathematisch bzw. nur näherungsweise berechnet oder grob geschätzt werden.

Das Ziel ist, die Messungen so vorzunehmen und auszugestalten, dass die Oberflächentemperaturen der Wärme abgebenden Fläche und der etwas erwärmten abgewandten Seite der Materialprobe korrekt genug bestimmt werden können. Dabei werden neben der Wärmeleitung auch die Wärmespeicherung und Dichte sowie das interne Materialgefüge mit ihren Wechselwirkungen erfasst. Feuchte geht dann nicht mehr ein und spielt eine untergeordnete Rolle, weil beim Probenmaterial und auch bei entsprechender Bauweise in der Praxis keine feuchten Konstruktionen mehr vorliegen.

6. Messergebnisse

Folgende Temperaturen wurden gemessen, Bild 1:

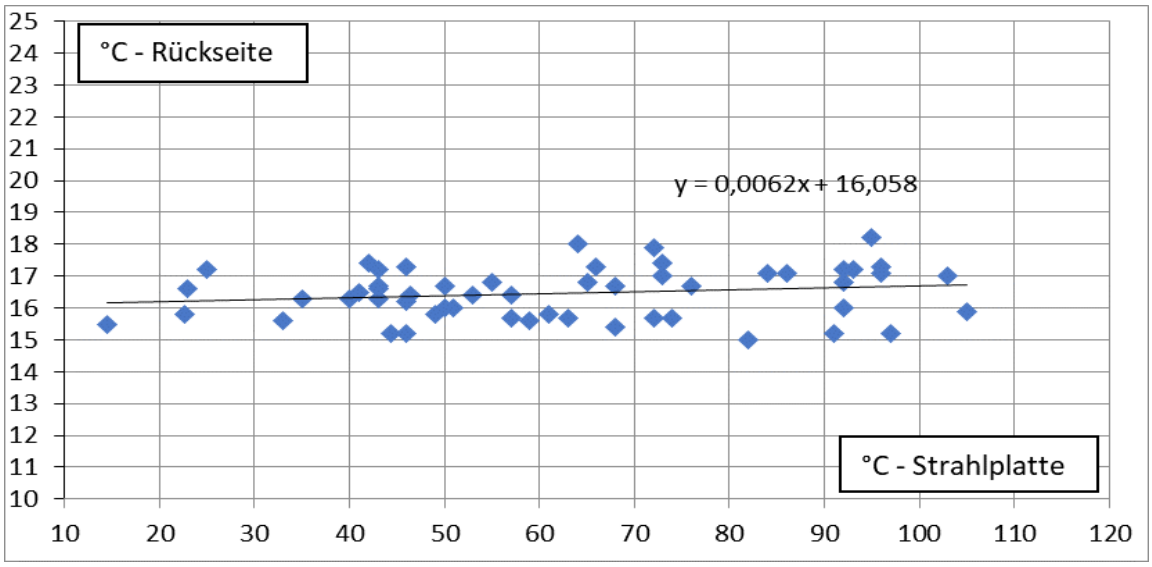

Bild 1: Temperaturmesswerte [°C] von Quelle (x - horizontal) und von Probenrückseite (y - vertikal)

Über 50 Messungen wurden über einen Zeitraum von 9 Tagen mit unterschiedlichen Einflussfaktoren vorgenommen. Dabei wurden drei Bereiche empirisch gestaltet:

a) Links – der eigentlich interessierende Aufgabenbereich von rd. 10 bis 40°C.
   Hier ist Wohnraumtemperatur und Wärmeeintrag von außen wie durch Sonnenstrahlung maßgebend. Aus dieser Punkteansammlung lässt sich kein Trend ableiten, was

mit präzisen Messgeräten möglich wäre, aber nicht sein muss. Allein die Oberflächenstruktur der glänzenden und profilierten Messflächen kann das stören.

b) Mitte – langestreckt, von rd. 40 bis 80°C.
Hier wird der „versteckte" bzw. „vermutliche" Verlauf (Gesetzmäßigkeit) erwartet. Manche Messungen wurden zum Teil schnell vorgenommen, was neben der Oberflächenstruktur der Hauptgrund für die Abweichungen ist.

c) Rechts – sehr warmer Testbereich bis über 100°C.
Es zeigt sich auch hier, dass ein kontinuierlicher Verlauf fortgeführt wird.

Aus den Messdaten von Bild 1 kann weiterhin entnommen werden:

d) Es lässt sich kein, zumindest nur ein vernachlässigbarer Anstieg erkennen, sodass auch die Rückseite der Probe wärmer wird.

e) Gegen eine Regression spricht der Regressionskoeffizient von nur $R^2 = 0{,}06$.

f) Die Streuung um die Regressionsgerade liegt etwa bei ±2K, bei einem Temperaturbereich der Strahlplatte bis über 100°C.

Es wurde immer mit dem gleichen einfachen Gerät gemessen, also mit dem gleichen Messgerätefehler. Die Streuung hat durchaus auch andere Ursachen. Bei großen Abweichungen gilt es weiter zu beachten (nur zur ganz groben Orientierung!):

Vertrauensbereich	bei 100 Werten könnten etwa 5 außerhalb von 3σ–Grenze liegen
Ausreiser	sind legitim, sollte hier maximal 1 x auftreten

Wie bei den oben erwähnten Betonsorten ist auch hier zu beachten, dass die Streubreiten nicht horizontal oder vertikal mit σ-Vertrauensbereichen von beiden Messwerten zugeordnet werden, sondern durch den kürzesten Abstand vom Messwert senkrecht zur Regressionsgeraden. Dieser Abstand (Vektor) wird durch einen üblichen dx- und dy-Ast gebildet, der deutlich kleiner ist und auf Grund anderer Messwertverläufe bei etwa 1/20 davon liegen könnte.

Verinnerlicht man sich jetzt diese kurzen Abstände zur Kurve (hier Gerade) für jeden Messpunkt, dann kann man ohne weitere mathematische Betrachtungen beruhigt davon ausgehen, dass die Abweichungen entgegen der Streuung von f) der funktionale Zusammenhang des Wärmedurchgangs sehr stark ist und für die Ableitung des Wärmedurchgangskoeffizienten bestens geeignet ist.

7. Wärmekennwerte

Eine Berechnung des Wärmedurchgangs mit den unvollständigen Wärmeleitungsformeln ist nicht möglich. Gemäß der Strahlungsphysik ergibt sich die Wärmestrahlung in einem geschlossenen Raum in Abhängigkeit von der absoluten Temperatur zu

Q = 5,67*2*0,93*((273+t)/100)^4

mit	Qrs	W/m²
	t	Temperatur in °C
	5,67	Stefan-Boltzmann-Konstante in W/(m²K⁴)
	2	Faktor für polarisierte Hohlraumstrahlung
	0,93	Emissionsgrad ε (-).

Bei diesem Reflexionspaket mit mehrfachem, geringem Schichtenabstand vom LupoTherm ***LPT-17*** ergibt sich im 20°C warmen Raum mit einer 1 K wärmeren Strahlung auf der Rückseite (außen) ein Temperaturanstieg von 0,0062 K.
Bei dieser Temperaturdifferenz ergibt sich ein Wärmefluss von 0,000.39 W/(m²K).

Daraus ergibt sich ein Ausgangswert für den Wärmewiederstand von 549 m²K/W.

Hinweis
Die Kennwerte beinhalten bewusst keine statistischen Abweichungen (sog. Fehleranteile), was in der Bauphysik allgemein üblich ist. Gleichwohl: Ein Messwert ohne Fehlerangabe ist streng genommen wertlos (Aussage von Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig).

1.4. Wärmedurchgangskoeffizient U

Unter Berücksichtigung eines angenommenen 3-fachen Sicherheitsfaktors ergibt sich immer noch ein äußerst kleiner Wärmedurchgang von

U-Wert = 0,0055 W/(m²K).

Der Sicherheitsfaktor soll Ausnahmensituationen wie z.B. punktuelles Zusammendrücken oder vorrübergehendes Auffeuchten/Austrocknen, leichtes Verstauben usw. erfassen. Bei sachgemäßer Behandlung (Lagerung, Einbau usw.) sowie strenge Kontrollmaßnahmen wie Luftdichtheitstest können grobe Einflüsse aber ausgeschlossen werden.
Der Sicherheitsfaktor wird für Baustoffe mit 1,2 für Wärmeleitung vorgegeben. Hiermit soll wegen der getrockneten Laborprüfkörper der Feuchteeinfluss in der Praxis berücksichtigt werden. Dieser Einfluss wird bei LupoTherm ***LPT-17*** nicht der Fall sein, weil die Nutzungs-

bedingungen ein Auffeuchten nicht erlauben dürfen bzw. nicht können, sofern keine Bau- oder Nutzungsfehler oder dergleichen grobe Einflüsse vorliegen.

1.5. Wärmedurchgangswiderstand R

Aus dem Kehrwert des Wärmedurchgangskoeffizienten ergibt sich der Wärmedurchgangswiderstand mit

R-Wert = 182 m²K/W

Wärmeübergangswerte entfallen bzw. sind bei Strahlung grundsätzlich nicht möglich. Auch Wärmeleitung der Luft ist im LupoTherm ***LPT-17***-Material vernachlässigbar bzw. wird durch die Messanordnung mit erfasst.

1.6. Wärmeleitzahl λ

Das infrarotaktive LupoTherm ***LPT-17***-Material hat eine Nenndicke von 32 mm. Es sollte im eingebauten Zustand so gut wie keine Berührungsflächen haben.

Wo die Reflexion beidseitig frei wirkt, also nur von Luft berührt wird, ist vorgenannter U-Wert anzusetzen. Bei Konstruktionsflächen wie Wände und abgehängte Decken kann das leichter erreicht werden als im Fußbodenaufbau. Je nach Art und Größe des Abstandshalters wird bei Berührung der Wärmedurchgang verstärkt und **ist zu berücksichtigen.**

Bei einer Einbaudicke von maximal 40 mm soll zur Konstruktionsoberfläche beidseitig etwa ein Spalt von 2-3 mm entstehen. Damit kann eine Wärmeleitzahl von

λ = 0,0055 * 0,04 = **0,00022 W/(mK)**

angesetzt werden. Das ist praktisch Null-Wärmedurchgang.

Dieser Wert kann als Konstante auch für größere Einbaudicken angesetzt werden, sofern die anliegenden Baustoffe in der Berechnung noch berücksichtigt werden.

Dieses für die Praxis ausreichend formstabile Reflexionsmaterial erlaubt zuzüglich einer konstruktiven Abdeckung inklusive Luftschicht (nur als Abstand für die Reflexion) problemlos den Passivhauskennwert für den spezifischen Transmissionswärmeverlust von 15 kWh/(m²a) einzuhalten.

1.7. Vergleichswärmedämmdicke

Vergleichswärmedämmdicke $\mathbf{d_{äqi}}$ **= 5,82 m** für WLG 032

8. Literatur

Baehr&19 Baehr Hans Dieter, Stephan Karl: Wärme- und Stoffübertragung. 10. Auflage, Springer Vieweg

Blum&19 Blum Rainer, Reimann Klaus, Roithmayr Robert: Wärmedämmung versus Temperaturisolierung. Über das Energieübertragungsverhalten von dünnen Gebäudehüllen. www.bauplaner-spezial.de bauplaner Dämmtechnik1

Fleisch19 Fleisch, Robert: Reale Wärmeströme sichtbar machen. Das Ziel: eine echte Wärmewende. www.bauplaner-spezial.de bauplaner Dämmtechnik2

Föll Es gibt keine "einfachen" Lösungen des 2. Fickschen Gesetzes; weder für unser Beispiel noch für andere "einfachen" Fälle. H. Föll, Internet

Horn12 Horn, Wolfgang. Gutachten zur thermischen Isolierleistung von Lu..po.Therm B2+8. Köhra 2012.

Horn13 Verfahren zur Bestimmung des Wärmedurchgangs und der Phasenverschiebung von Materialien, 2013

Lindner60 Lindner, Arthur: Statische Methoden. Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart, 1960

Lindner69 Lindner, Arthur: Planen und Auswerten von Versuchen. Birkhäuser 1969

Weber67 Weber, Erna: Grundriss der Biologischen Statistik. Gustav Fischer Verlag Jena, 1967

Meier07 Meier, Claus: Die Wärmeleistung der Strahlungstechnik. In: raum&zeit 145/2007

Volland14 Volland . Volland: Wärmeschutz und Energiebedarf nach EnEV 2014. M Rudolf Müller 2014. 4. Auflage, S. 116

Jung21 Jung, Wilfried J.: Vergleich-LPT17: LPS-Mitteilung zu Versuchs- und Sanierungsobjekten. Persönliche Mitteilung, 2022

Kampfert Warum LupoTherm funktioniert. Persönliche Mitteilung von W. Jung LPS

Karczewski19 Karczewski, Thomas: Neue Regeln in der Bauzeit? der Bauschaden Ausgabe 38, S. 56-59

Nachfolgende Literatur aus Gutachten zur thermischen Isolierleistung von Lu..po.Therm. W. Horn 2012:

NORMAPME Interessenvertretung der KMU – im Auftrag der Europäischen Kommission, mit Vetorecht bei EOTA und CEN in Brüssel u.v.m.

Fraunhofer12 WUFI® Update-Seminar 2012: Strahlung, Verschattung und Oberflächenübergang. Fraunhofer IBP

Hauser&al09 Hauser G., Schade A.; Sinnesbichler: Potentiale und Grenzen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien. IBP-Mitteilung 495, 36 (2009) Neue Forschungsergebnisse, kurz gefasst.

Hauser&al11 Hauser Gerd, Kersken Matthias, Schade Almuth, Sinnesbichler Herbert: Experimentelle und theoretische Untersuchungen von Infrarot reflektierenden Dämmmaterialien. Sonderdruck aus Bauphysik 33 (2011), Heft 1, Seite 33-42, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co KG

Hejhálek Hejhálek Jiří: Mehrschichtige Wärmeisolierung mit IR-Reflexionsfolien. Word-dokument von LPS GmbH

Hillemacher05 Hillemacher B.: Berechnungen zur Wärmeübertragung durch Strahlung unter Einsatz der Verbundwärmedämm-Matte „Aluthermo Quattro". WLiK Rheinisch-Westfä-

lische Technische Hochschule Aachen. Im Auftrag der Fa. Aluthermo AG, Burg Reuland, Belgien

Hintz&al12 Hintz B., Pöllmann H., Krcmar W.: Reduktion von Wärmestrahlungsverlusten in Hochlochziegeln – Ein neuer Konzept zur wärmetechnischen Altbausanierung. B + B Forum, Energetische Fassadensanierung

NORMAPME Jung Wilfried J.: Technische Daten und Gegenüberstellung der Vergleichsmessung von SFIRMM, TRADA und IBP zu Multifoil und Mineralwolle

Jung12 Jung Wilfried J. mit Bericht von Meier Claus: Die Wärmeleistung der Strahlungsheiztechnik

Kearley07 Kearley Vic: Multifoil testing at TRADA. TRADA Technology

König07 König Norbert: Thermal insulation with IR-reflective multifoil products – on overview. Head of Department New Building Materials + Components. Normapme Conference 16.04.2007, Stuttgart

Künzel&al07 Künzel Hartwig M., Sedlbauer Klaus: Klarstellung zur bauphysikalischen Wirkung Infrarot reflektierender Schichten. IBP-Mitteilung 479, 34 (2007) Neue Forschungsergebnisse, kurz gefasst.

Riedl Riedl Wolfgang: Lu..po.Therm B2+8 Strukturmodell für CFD-Simulation. THERMREN GmbH, Münchner Technologiezentrum Agnes-Pockels-Bogen 1, 80992 München

SFIRMM07 sfirmm: For the promotion of thin reflective multifoil products and for the creation of an European certification applied to these products. syndicat des fabricants d'isolants reflecteurs minces multicouches