

# Mehrschichtige Wärmeisolierung mit Reflexionsfolien!

## 3cm Lu..po.Therm statt 20cm konvektiver Dämmung?

Auf der BAU 2009 wurde die mehrschichtige Wärmeisolierung Lu..po.Therm B2+8, die aus acht Polyethylen-Luftpolsterfolien und fünf mit Aluminium bedampften reflektierenden Kunststofffolien besteht, vorgestellt. Bei einer Gesamtdicke von 3 cm beträgt die Wärmeleitzahl dieser Isolierung  $\lambda=0,006 \text{ W/(mK)}$  und erreicht damit eine Dämmleistung von ca. 21 cm Mineralwolle. Das Prinzip dieser Isolierung wird in diesem Artikel beschrieben.

Im technischen Bericht [1] steht, dass die genannte Wärmedämmwirkung durch vergleichende "in situ" Messungen erzielt wurden, die mit unterschiedlichen Prototypen von wissenschaftlichen Instituten in drei Ländern erfolgten. Das Messergebnis weist laut Bericht einen doppelt so guten Wert auf, wie die Berechnung gemäß einer nicht weiter spezifizierten DIN-Norm. Dank der Werte für die Wärmeleitzahlen, die wesentlich besser waren, als die errechneten, beträgt der tatsächlich erreichte Wert für den Wärmedurchgangskoeffizienten der gesamten Folie  $U=0,181 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$  und damit etwa nur die Hälfte der Berechnung laut DIN. Dieses Ergebnis wurde hauptsächlich dank des ausgezeichneten Reflexionsgrades der Aluminiumfolie mit bis zu 98% erreicht, die so wesentlich den Transport der Wärmestrahlung durch die mehrschichtige Folie einschränkt.

Der Wärmeleitzahlwert der hybriden mehrschichtigen Isolation Lu..po.Therm B2+8 in dem keine Widerstände bei der Wärmeübertragung an deren beiden Außenschichten einbezogen sind, beträgt  $\lambda=0,006 \text{ W/(m K)}$ . Das ist etwa ein Sechstel des Wertes für Mineralwolle oder für Polystyrol. Soweit die Zitation aus dem Dokument [1].

### Physikalisches Prinzip

Die Hybridisolation Lu..po.Therm B2+8 besteht aus acht Luftpolsterfolien aus HD-PE = hochdichtes Polyethylen und fünf haardünnen PP-Folien mit Al-Metallisierung, die jeweils nach jeder zweiten Luftpolsterfolie platziert sind, vgl. Schema in Abb. 2.

Aus Sicht des Wärmetransports kann dieser Verbund ungefähr als Wärmeübertragung über mindestens 16 inneren Übergangflächen zwischen Luft und Feststoff beschrieben werden; die Hälfte davon als Übergang zwischen Luft und der reflektierenden Aluminium-Oberfläche. Der Rest zwischen Luft und Polyethylen. Dazu kommen noch zwei Übergänge an den Außen-(Sicht-)flächen der Folie. Bei der Beschreibung der mehrschichtigen, dünnen Isolierung beginnen wir mit einfachen Beispielen.

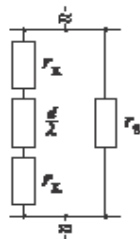


Abb. 1. Elektrisches Ersatzschema einer Schicht aus Beispiel 1, auf dessen Grundlage das Verhältnis (1) des Widerstands  $r_s$  bei Wärmeübertragung durch Strahlung, die parallel zum Widerstand bei Wärmeleitung und -strömung wirkt, abgeleitet wurde.

**Beispiel 1:** Betrachten wir jetzt den Wärmedurchgangskoeffizienten bei einem allgemeinen mehrschichtigen Verbund, zunächst ohne Al-Reflexion, mit 9

dünnen Folien, die die Wärmestrahlung vollständig schlucken (Emissionsgrad  $\varepsilon = 1$ ) und den 8 Luftschichten mit je 3,75 mm. Der Widerstand bei der Wärmeübertragung soll  $r = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  sein, so wie in den Normen ČSN 73 0540-3:2005 und EN ISO 6946 angegeben ist. Dieser Widerstand hat eine Komponente  $r_k = 0,50 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , die den Wärmeübergangswiderstand bei Leitung und Strömung darstellt und eine zu dieser parallelen Komponente  $r_s = 0,18 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , die den Widerstand bei Wärmeübergang bei Strahlung darstellt. Weil der Wärmeübergangswiderstand  $r_s$  für zwei benachbarte Flächen, zwischen denen ein Wärmeaustausch durch Strahlung stattfindet, gleich ist, können wir den Gesamtwiderstand  $R_1$ , dieses mehrschichtigen Verbunds wie folgt beschreiben:

$$R_1 = 8 \cdot \frac{r_k \cdot (2r_k + \frac{d}{\lambda})}{r_s + 2r_k + \frac{d}{\lambda}} = 1,215 \frac{\text{m}^2 \text{ K}}{\text{W}}, \quad (1)$$

wobei  $d/\lambda$  der Widerstand einer Luftschicht ist, in dem  $d = 0,0375 \text{ m}$  die Dicke der Schicht ist und  $\lambda = 0,0259 \text{ W/(mK)}$  die Wärmeleitzahl der Luft bei  $20^\circ\text{C}$  ist. Die Luftströmung in einer so dünnen Schicht vernachlässigen wir. Nach Errechnung des Widerstandes  $r = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  bei der Wärmeübertragung an den Außenbereichen des gesamten Verbunds ist

$$U_1 = \frac{1}{0,13 + R + 0,13} = 0,678 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}. \quad (2)$$

Teilen wir die Gesamtdicke 0,03 durch den Wert des Wärmewiderstandes  $R_1$ , erhalten wir die Wärmeleitzahl der mehrschichtigen Folie  $\lambda_1$ :

$$\lambda_1 = \frac{0,03}{R} = 0,0247 \frac{\text{W}}{\text{m K}}. \quad (3)$$

Dieser Wert ist niedriger als die Wärmeleitzahl der Luft bei  $20^\circ\text{C}$ . Das ist deshalb so, weil dem Luftstrom die größere Menge Grenzfläche Luft-Feststoff entgegensteht, von denen jede einen Widerstand ungleich Null bei Wärmeübertragung, -leitung, -strömung und bei Strahlung hat.

### Einfluss der Wärme reflektierenden Aluminium-metallisierten Folien

Durch Einlegen der PP-Al-met.-Folie bringen wir in den mehrschichtigen Verbund scheinbare Widerstände  $r_s$  bei Wärmeübertragung durch Strahlung ein, die parallel zum

Widerstand bei Wärmeleitung und Wärmeströmung wirken, aber Extremwerte annehmen können. Bei der Errechnung der scheinbaren Übergangswiderstände bei Strahlung  $r_s$  gehen wir von der Gleichung für den Wärmeaustausch zwischen zwei parallelen und für Wärmestrahlung undurchdringlichen Schichten aus

$$j = \sigma \cdot \frac{T_1^4 - T_2^4}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (4)$$

wobei  $j$  die Intensität des Strahlungsstromes in  $W/(m^2 K)$ ,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$ , die Stefan-Boltzmann-Konstante,  $T_1$  und  $T_2$  die thermo-dynamische Wärmen benachbarter Oberflächen in Kelvin,  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$ , deren (dimensionslosen) relativen Emissionsgrade (deren Ergänzungen  $1-\epsilon$  zu eins die Reflexionsfähigkeit ist) darstellen.

Für nähere Wärmen  $T_1 \rightarrow T_2$  legen wir  $T = (T_1 + T_2)/2$  zu Grunde, und das Verhältnis (4) drücken wir mit Hilfe der Taylorreihe erster Ordnung aus. Für den gesuchten scheinbaren Widerstand  $r_s$  bei Wärmeaustausch durch

$$r_s = \frac{(T_1 - T_2)}{j} = \frac{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}{4\sigma \cdot T^3} \quad (5)$$

Strahlung zwischen zwei Schichten gilt: Der Widerstand  $r_s$  in  $m^2 K/W$  hängt indirekt proportional von der dritten Potenz der thermodynamischen Wärme ab und wächst mit sinkenden Emissionsgraden der Oberflächen, zwischen denen es zu einem Wärmeaustausch mittels Strahlung kommt.

Wir nennen ihn *scheinbar*, weil die Strahlung ein anderes physikalisches Wesen hat als das statische Wesen des Wärmewiderstands, der – im Gegensatz zum Widerstand  $r_s$  bei Strahlung – vom Abstand der Schichten, zwischen denen Wärme geleitet wird und strömt, abhängt.

Für die Werte  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$ , die eine schwarze (vollständig absorbierende und nicht reflektierende) Oberfläche beschreiben, ergibt sich bei einer Temperatur von  $20^\circ C$  ( $293,15 K$ ) nach Einsetzen in (5)  $r_s = 0,18 m^2 K/W$ . Diesen Wert haben wir in den Berechnungen gemäß Formel (1) verwendet.

Für Emissionsgrade Wärme übertragender Flächen  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$  ist  $r_s = 3,33 m^2 K/W$  und für Emissionsgrade  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0,02$  sogar  $r_s = 17,33 m^2 K/W$ . Für einen Null-Emissionsgrad mindestens einer Oberfläche ist  $r_s \rightarrow \infty$ .

Weitere Werte des scheinbaren Widerstands  $r_s$  bei Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen zwei radial undurchlässigen Schichten mit unterschiedlichem Emissionsgrad in Abhängigkeit zur Temperatur sind in Tabelle 1 aufgeführt.

$20^\circ C$	$10^\circ C$								
C	C								
$0^\circ C$	$-20^\circ C$								
		$\epsilon_2 = 1$		$\epsilon_2 = 0,5$		$\epsilon_2 = 0,1$		$\epsilon_2 = 0,02$	
$\epsilon_1 = 1$		0,18	0,19	0,35	0,39	1,75	1,94	8,75	9,71
		0,22	0,27	0,43	0,54	2,16	2,72	10,82	13,59
$\epsilon_1 = 0,5$				0,53	0,58	1,93	2,14	8,93	9,91
				0,65	0,82	2,38	2,99	11,03	13,86
$\epsilon_1 = 0,1$						3,33	3,69	10,33	11,46
						4,11	5,16	12,76	16,04
$\epsilon_1 = 0,02$								17,33	19,23
								21,42	26,91

Tab. 1 Scheinbare Übergangswiderstände bei Wärmeaustausch durch Strahlung zwischen zwei radial undurchlässigen parallelen Flächen mit unterschiedlichem Emissionsgrad in Abhängigkeit zur Temperatur. Berechnung nach Gleichung (5).

**Beispiel 2:** Wir ersetzen jetzt jede ungerade Folie aus Beispiel 1 mit wärmeabweisender Aluminiumfolie mit einem Reflexionsgrad von 90 % also mit einem Emissionsgrad von  $\epsilon_1 = 0,1$ . In den geraden Positionen belassen wir die Folie mit hohem Absorptionsvermögen, also mit einem relativen Emissionsgrad von  $\epsilon_1 = 1$ . Dem entspricht gemäß Tab. 1 der Widerstand bei Strahlung zwischen zwei benachbarten Folien ( $\epsilon_1 = 0,1, \epsilon_2 = 1$ )  $r_s = 1,75 m^2 K/W$  und gemäß den Verhältnissen (1), (2) und (3) bei immer gleichem Widerstand  $r_K = 0,50 m^2 K/W$  dieser Wärmeeigenschaft des Verbunds:

$$R_{II} = 5,55 m^2 K/W$$

$$\lambda_{II} = 0,0054 W/(mK)$$

$$U_{II} = 0,158 W/(m^2 K)$$

Das teilweise Ersetzen mit Aluminiumfolie führte zu qualitativ verbesserten wärmeisolierenden Eigenschaften der mehrschichtigen Hybridisolation. Ihre Wärmeleitfähigkeit sank auf ca. ein Fünftel des Wertes für Luft bei einer Temperatur von  $20^\circ C$ .



Abb. 2 Vereinfachte schematische Anordnung der hybriden Folie **Lu.po.Therm B2+8**, die aus 8 Luftpolsterfolien (schraffierte Schichten) und aus 5 Aluminiumfolien (graue horizontale Striche) in den ungeraden Positionen besteht. In den geraden Positionen befindet sich die Luftpolsterfolie aus HD-PE.

### Lu.po.Therm B2 +8

Die Hybridisolation **Lu.po.Therm B2 +8** lässt sich so beschreiben, dass die technisch nicht realisierbaren Luftspalten aus dem vorher genannten Beispiel durch HD-PE-Luftpolsterfolien ersetzt wurden, die für Wärmestrahlen durchlässig sind, so wie die HD-PE-Folie in den

geraden Positionen. Das hat seine Begründung darin, das HD-PE, **siehe Nachtrag 1** in der Zusammenfassung des Artikels, eine hohe Durchlässigkeit für Wärmestrahlung im Wellenlängenbereich von 2 bis 35 Mikrometer aufweist. Der Wärmewiderstandswert ist dann:

Bei der Ableitung  $R_{III}$  wird zu Grunde gelegt, dass jede doppelte Luftpolsterfolienschicht zwischen den Aluminiumfolien eine eigenständige Schicht darstellt. Insgesamt sind vier solcher Doppelschichten vorhanden.

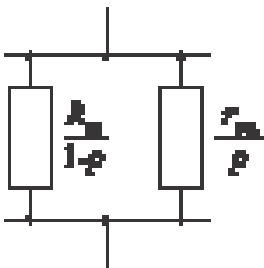
$$R_{III} = 4 \cdot \frac{r_s \cdot (4r_K + 2 \frac{d}{\lambda})}{r_s + 4r_K + 2 \frac{d}{\lambda}} \quad (6)$$

Das heißt, dass parallel zu den Widerständen  $r_s = 3,3 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  im Ersatzschema einer Schicht, vgl. Abb. 2, vier Übergangswiderstände  $r_K$  und zwei Widerstände bei der Wärmeleitung und Wärmeströmung durch die Luft  $d/\lambda$  existieren. Nach Einsetzen in (6), (2) und (3) erhält man:

$$\begin{aligned} R_{III} &= 5,44 \text{ m}^2 \text{ K/W} \\ \lambda_{III} &= 0,0055 \text{ W/(m K)}, \\ U_{III} &= 0,159 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}. \end{aligned}$$

Die Widerstände  $R_{II}$  und  $R_{III}$  entsprechen zwei Grenzfällen, bei denen die Luftpolsterfolie im ersten Fall völlig undurchlässig für Strahlung (weil sie diese ganz absorbiert) und im zweiten Fall im Gegenteil vollkommen durchlässig ist.

Die Realität wird irgendwo zwischen diesen beiden Modellen liegen, jedoch eher näher zum Modell **Lu.po.Therm B2 +8** mit  $R_{III}$ . Beide Ergebnisse  $R_{III}$  und  $R_{II}$  sind aber fast identisch. Darum werden wir den Einfluss der Durchlässigkeit der Luftpolsterfolie mit einer Stärke von 0,75 cm für die Wärmestrahlung nicht weiter berücksichtigen.



**Abb. 3** Vereinfachtes Ersatzschema der Verbundfolie **Lu.po.Therm B2+8**, das den Widerstand  $r_{PE}$  einbezieht, der die Wärmeverluste auf Grund der Leitung durch Polyethylen darstellt.

### Leitfähigkeit der Luftpolsterfolie

Unser Ergebnis  $\lambda_{III} = 0,0055 \text{ W/(m K)}$  ist etwas besser als  $\lambda = 0,006 \text{ W/(m K)}$ , wie im Bericht [1] aufgeführt. Das ist auch dadurch gegeben, dass in das Modell nach Gleichung (6) nicht der Beitrag der Leitfähigkeit der doppelten Luftpolsterfolie eingerechnet wurde. Der sollte bei gleichen Produktionsverfahren, gleichen Materialien und gleichen Foliengeometrien etwa gleich sein.

Die Luftpolsterfolie in **Lu.po.Therm B2+8** stellt nicht nur Luft dar, sondern auch HD-PE, das eine Wärmebrücke zwischen den Aluminiumfolien bildet. P soll der durchschnittliche Teil der Gesamtfoliensfläche

sein, die diese Wärmebrücke einnimmt. Der restliche Teil 1-p soll Luft sein.

Im elektrischen Ersatzschema, siehe Abb. 3, kann diese Wärmebrücke mit dem weiteren Widerstand  $r_{PE} = 8 \text{ d}/\lambda$  beschrieben werden, bei dem  $d = 0,0375 \text{ m}$  die Stärke der einzelnen Schicht und  $\lambda_{PE} = 0,74 \text{ W/(m K)}$  die Wärmeleitfähigkeit von HD-PE ist.

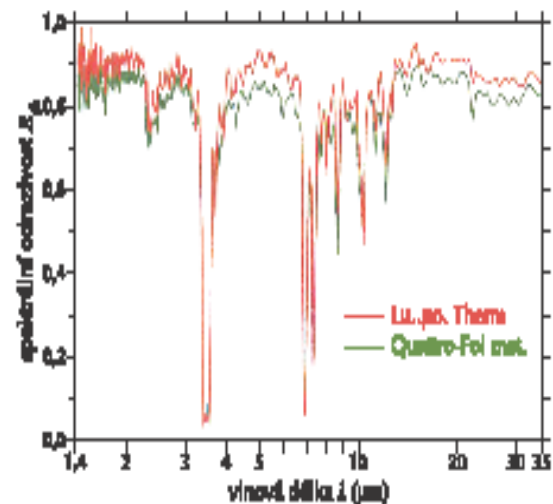
Parallel zu ihm existiert der Widerstand  $R_{III}/(1-p)$ , wobei  $R_{III} = 5,44 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  aus dem Modell ohne HD-PE-Brücke ist. Durch einfache Berechnung (Zusammensetzen paralleler Widerstände) kommen wir auf folgende Lösung (Index „LT“ stammt aus der Abkürzung für **Lu.po.Therm**):

$$\begin{aligned} \rho &= 6,54 \cdot 10^{-4} \\ R_{LT} &= 5,00 \text{ m}^2 \text{ K/W} \\ \lambda_{LT} &= 0,006 \text{ W/(m K)} \\ U_{LT} &= 0,17 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}. \end{aligned}$$

### Ergebnisanalyse

Es ist offensichtlich, dass der Grundstock zur extrem hohen Isolierwirkung der dünnen mehrschichtigen Folien die großen Widerstandswerte beim Wärmeübergang sind. Es sind nicht nur die scheinbaren Widerstände  $r_s$ , die zu den Strahlungsmechanismen gehören, genauso bedeutend sind auch die Widerstände  $r_K$  der nicht strahlungsbasierten Mechanismen des Wärmetransports.

Aus dem Bericht [1] stammt die Angabe, dass die Aluminium metallisierten Folien in der Schichtfolge einen Reflexionsgrad bis zu 98 % aufweisen, d.h. der Emissionsgrad  $\varepsilon = 0,02$ . Nach Tab. 1 entspricht dem ein Wert von  $r_s = 17,33 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ . Das Ergebnis gleich  $\lambda_{LT} = 0,006 \text{ W/(m K)}$  entspricht, wie im Bericht genannt, dann einem Wert von  $r_K = 0,295 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ .



Spektraler Reflexionsgrad  $R_{gh}$  Wellenlänge  $\lambda$  ( $\mu\text{m}$ )

**Abb. 4** Spektrale Abhängigkeit des Reflexionsgrades der Aluminiumfolie **Lu.po.Therm B**, geschützt durch einen dünnen HDPE-Film. Übernommen aus der Pressemitteilung für die Fachpresse, veröffentlicht am 20.10.2009 anlässlich der BAU 2009 in München, LPS GmbH, A-5144 Handenberg Österreich.

In Abb. 4 ist das Messergebnis des spektralen Reflexionsgrades der mit einer PP-Schicht geschützten Aluminium-Metallisierung im Wellenlängenbereich 2 bis

35 Mikrometer, ebenfalls aus [1] übernommen. Diese Korrosionsschutzfolie wird nur auf beiden Außenseiten des mehrschichtigen Verbunds eingesetzt und deren Reflexionsgrad beträgt durchschnittlich 0,88 und entspricht damit einem Emissionsgrad von 0,12.

Mit dieser Schutzfolie ist für den gesamten Verbund  $U_{LT} = 0,181 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ , was im Verhältnis mit den Werten der Wärmeisolierung von **Lu.po.Therm B2+8** steht. Für den niedrigeren Reflexionsgrad, den niedrigeren Emissionsgrad und ebenfalls die zwei Absorptionszonen im Wellenlängenbereich 3,3 und 7 Mikrometer ist nach Angaben des Herstellers der Schutzfilm aus PP auf der Aluminiumschicht verantwortlich. Das belegt er mit Messungen einer anderen, unabhängigen Stelle (vgl. Abb. 5.) bei der das infrarote Spektrum des Reflexionsgrades und die Durchlässigkeit der einzelnen dünnen HD-PE-Folien mit den zwei gleichen situierten Hauptabsorptionszonen gemessen wurde. Allgemein gilt, dass ein kleinerer Reflexionsgrad der Aluminiumfolie mit einem höheren Übergangswiderstand  $r_K$  bei Wärmeleitung und Wärmeströmung kompensiert werden kann.

Oder es können in den mehrschichtigen Verbund mehrere Übertragungswiderstände  $r_K$  eingearbeitet werden. Der Leser hat sicherlich bemerkt, dass in der realen Folie **Lu.po.Therm B2+8** eigentlich keine Grenzflächen zwischen der Luft in den Noppen und der Aluminiumfolie bestehen. Ein genaueres Modell für die Ableitung der Formel muss damit rechnen, dass statt 4 Übergangswiderständen  $r_K$  zwischen zwei Aluminiumfolien mindestens 10 vorhanden sind, weil jede Noppe ihre eigene HD-PE-Hülle hat. Das Hinzufügen jeder dünnen PP-Folie (ohne Noppen) repräsentiert zwei Widerstände  $r_K$  mehr. Verwenden wir in (6) statt der Zahl 4 die Zahl 10, die die Anzahl der nicht strahlenden Übergänge zwischen zwei Aluminiumfolien darstellt, erhalten wir bei  $p = 6,54 \cdot 10^{-4}$  und  $r_S = 3,33 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  den gewünschten Wert  $\lambda_{LT} = 0,006 \text{ W/(mK)}$ , gerade wenn  $r_K = 0,20 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  ist.

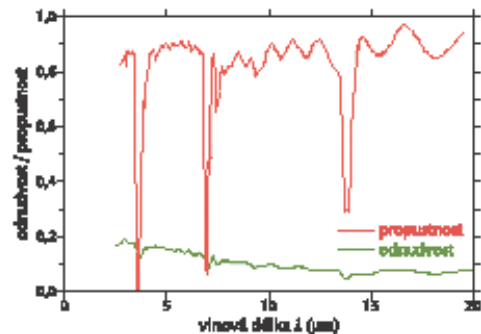
### Übergangswiderstände

In [1] sind die Übergangswiderstände  $r_K$  bei Wärmeleitung und Wärmeströmung unberücksichtigt geblieben, obwohl gerade und nur wegen ihnen die Wärmeleitfähigkeit der Verbundfolie **Lu.po.Therm B2+8** niedriger – und sogar wesentlich niedriger als bei Luft – ist.

Das Kaskadensystem in der Hybrid-Isolation bewirkt den ökonomischen Isolierstoff. Der nicht strahlungs-basierte Wärmeübergang zwischen der festen Phase (Aluminium oder HD-PE) und Luft ist ein typischer statischer Vorgang auf molekularer Ebene.

Bei diesem tauschen Luftmoleküle, die auf ein schwingendes Kristallgitter (Aluminium) oder eine schwingende Polymerkette treffen, gegenseitig Energie aus. Die Luftmoleküle ändern dabei die Geschwindigkeit, also die Energie der Translationsbewegung und die mehratomigen Moleküle auch die Vibrationsenergie. Um die gleiche Energie, aber mit umgekehrten Vorzeichen, ändert sich die Vibration des Kristallgitters des Aluminiums bzw. die Vibration der Polymerkette. Die Änderungen im Vibrationszustand der Luftmoleküle und der Feststoffe sind quantisiert. d.h. dass nur Änderungen realisiert werden können, wenn die Energie um ein ganzes Vielfaches der Mindestenergie, dem sogenannten Quant, ansteigt oder abfällt.

Andere energetische Übergänge sind nicht erlaubt. Insbesondere im Fall von Aluminium kann das eine wesentliche Einschränkung der mit der Luft ausgetauschten Wärmemenge bedeuten: eine eventuelle Vernichtung des Quants der Vibrationsenergie (Photon) des Kristallgitters muss nicht der Energie für die Erzeugung eines Photons (höheres Vibrationsniveau) bei der Vibration der Luftmoleküle, insbesondere bei  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  und umgekehrt entsprechen. So, wie die scheinbaren Widerstände beim Wärmeübergang bei Strahlung  $r_S$  und Aluminiumfolie mit geringem Emissionsgrad hoch sind, kann auch der Widerstand  $r_K$  beim Wärmeübergang bei Leitung und Strömung zwischen der dünnen Luft-Aluminium-Schicht hohe Werte annehmen.



Transmissivität / Reflexionsgrad Wellenlänge  $\lambda$  ( $\mu\text{m}$ )

Abb. 5 In der Publikation **Radiative Cooling** des Autoren M. Martin (Martin zitiert Conley, R.T. „Infrared Spectroscopy“, Second Edition, Boston, MA. Allyn and Bacon, Inc. 1972, p. 2661) ist das Diagramm der spektralen Transmissivität und Reflexionsgrades von 12,7 Mikrometer starken HD-PE-Folie für elektromagnetische Wärmestrahlung von 2 bis 20 Mikrometer dargestellt.

### Nachtrag 1

In der Literatur wird bei hochdichten Polyethylen HD-PE, aus dem die Luftpolsterfolie gefertigt ist, eine hohe Transmissivität von 80 bis 90 % für Wärmestrahlung bei Wellenlängen von 2 bis 15 Mikrometer genannt, vgl. Abb. 5.

Nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz strahlt ein Körper mit einer Energie von  $10^\circ\text{C}$  elektromagnetische Wärmestrahlung am intensivsten in der Wellenlänge von 10 Mikrometern aus. Dieses Diagramm stützt sich auf die Annahme, dass sehr dünnes HD-PE, aus dem die Luftpolsterfolie gefertigt ist, Wärmestrahlung in signifikantem Umfang leitet, während Al-metallisierte Kunststoffolien diese überwiegend reflektieren.

Eine Absorption von Strahlungsenergie in den Luftpolsterfolien berücksichtigen wir nicht, da sich die Wärmeleitfähigkeit von HD-PE eins annähert, vgl. Abb. 3 und somit kann die Absorption vernachlässigt werden.

### Literatur:

[1] Wilfried Jung, Foliendämmstoffe = rentable Energieeffizienz,

LPS GmbH,  
Air Bubble Film + Hybrid Insulation Production  
A-5144 Handenberg, Gewerbering 1,

veröffentlicht am 21.10.2008.