

Bauphysik zwischen Anspruch und Wirklichkeit, Teil 2: Bauphysikalische Phänomene: die Emission

Grundsätzliches aus der Strahlungsphysik

Strahlung und Wellenlängen

Es geht um elektromagnetische Strahlung, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Es besteht ein Zusammenhang zwischen Frequenz f und Wellenlänge λ , weil $f \cdot \lambda = c$ (c = Lichtgeschwindigkeit).

Es besteht ein Zusammenhang Welle-Teilchen-Energie. Deshalb kann man das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung in Frequenz [1/s], in Photonen-Energie [eV] und in Wellenlänge [m] angeben. Die zeichnerische Darstellung ist eine Wellenlinie (Sinuskurve) entlang eines Strahls.

Strahlung		Wellenlänge	Energie	Frequenz
		langwellig	niedrigenergetisch	niedrig frequent
Radiowellen	LW - KW	10 km - 10 m		30 kHz - 30 MHz
Mikrowellen	cm-Wellen	10 cm - 1 cm		3 Ghz - 30 Ghz
Wärmestrahlung	mm-Wellen	1 cm - 1 mm		30 GHz - 300 Ghz
Infrarot	IR	1 mm - 750 nm	~ 1,0 eV	
sichtbares Licht		750 nm - 380 nm	1,6 - 3,2 eV	
Ultraviolett	UV	380 nm - 1 nm	3,2 eV - 1 keV	
Röntgenstrahlen		10 nm - 1 pm	0,1 keV - 1 MeV	
		kurzwellig	hochenergetisch	hoch frequent

Tabelle 1: Die Infrarotstrahlung im Elektromagnetischen Spektrum

Spektrumsbereich	Wellenlänge
UV (ultraviolett)	300 nm – 400 nm
VIS (sichtbares Licht)	410 nm – 722 nm
NIR (nahes Infrarot)	724 nm – 2.500 nm
IR (infrarotes Licht)	1.400 nm – 18.000 nm

Tabelle 2: Übersicht zu den Wellenlängen

Spektrumsbereich	Wellenlänge
Ultraviolettstrahlung UV-C	100 nm ... 280 nm
UV-B	280 nm ... 315 nm
UV-A	315 nm ... 380 nm
sichtbares Licht	380 nm ... 780 nm
Infrarotstrahlung IR-A	780 nm ... 1,4 μ m
IR-B	1,4 μ m ... 3,0 μ m
IR-C	3,0 μ m ... 1,0 mm

Tabelle 3: noch eine Übersicht zu den Wellenlängen, nach [Waller]

Infrarotstrahlung (IR) ist jener Teil des elektromagnetischen Spektrums, der sich von ca. 760 nm bis zu etwa 1 mm Wellenlänge erstreckt. Je nach Quelle ergeben sich geringe Abweichungen in der Zuordnung der Wellenlängenbereiche. 1 nm (Nanometer) = 1/1.000 μ m = 1/1.000.000 mm.

Das sichtbare Licht (VIS steht für visible) liegt im Bereich von ca. 380 nm – 780 nm. Dies sind umgerechnet 0,38 μm – 0,78 μm . Das sichtbare Licht ist die Solarstrahlung, welche man mit einem Prisma in die Spektralfarben zerlegen kann.

UV	Violett	Blau	Grün	Gelb	Orange	Rot	Infrarot
390	435	495	570	590	630	770	

Tabelle 4: Wellenlängen von sichtbarem Licht, Richtwerte in nm

Aus $\lambda = c / f$ lassen sich $f = 7,89 \cdot 10^{14}$ Hz für die kurzwellige Grenze ($\lambda = 380$ nm, violett) und $f = 3,85 \cdot 10^{14}$ Hz für die langwellige Grenze ($\lambda = 780$ nm, rot) bestimmen. Das Licht ist der Strahlungsbereich, für den das menschliche Auge empfindlich ist. Aus den Übersichten wird auch deutlich, dass die solare Strahlung kurzwelliger und somit höher energetisch ist als die IR-Strahlung.

Von Bedeutung sind auch die Randbereiche des sichtbaren Lichtes, da diese Strahlungen durchaus Wirkungen auf den Menschen haben können, ohne dass sie durch die Augen wahrgenommen werden können. Man denke dabei an die Wärmesensoren des größten menschlichen Organs, der Haut. Im Fachartikel „Behaglichkeit“ werden diese Zusammenhänge erläutert.

Wellenlänge	0,8 μm ... 2 μm	2 μm ... 6 μm	6 μm ... 20 μm
	760 nm ... 2.000 nm	2.000 nm ... 6.000 nm	0,006 mm ... 0,02 mm
Teilbereich des IR	nahes IR	mittleres IR	fernes IR

Tabelle 5: Teilbereiche des Infrarot

Abstrahlung, Emission

Im Gegensatz zu einem schwarzen Körper absorbieren Oberflächen realer Körper nur einen Bruchteil der auftreffenden Strahlung, ein weiterer Anteil wird reflektiert (ein weiterer Bruchteil durchdringt ggf. den Körper ohne Absorption).

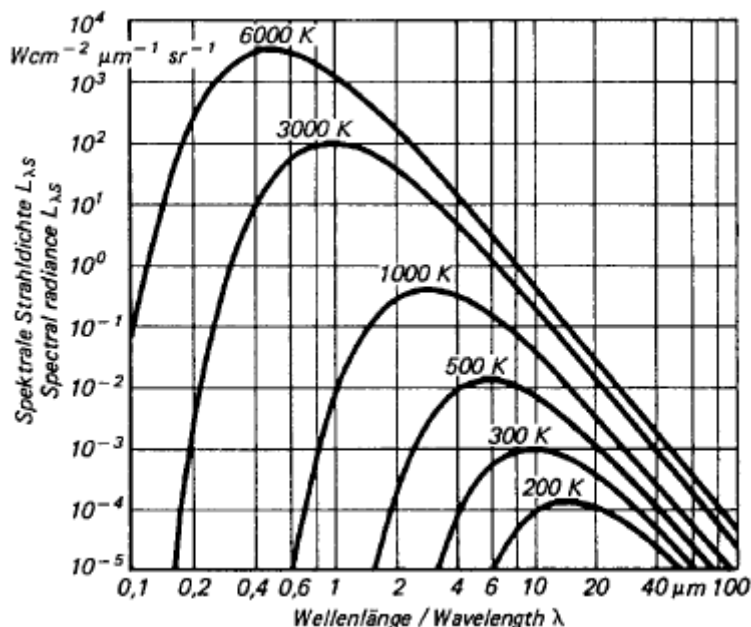


Bild 1: Strahlungscharakteristik eines schwarzen Strahlers in Abhängigkeit von der Temperatur nach [VDI 95]

Die Darstellung der Strahlungskurve für das Sonnenlicht liegt bei ca. 6.000 K Oberflächentemperatur (genau sind es ca. 5.880 K). Das entspricht einer Strahlungsleistung von 7.220 W, bei einer Kerze mit 1.500 K sind es nur noch 28 W. Mit steigender Temperatur verschiebt sich das Maximum zu immer

kürzeren Wellenlängen und die Kurven eines Körpers bei verschiedenen Temperaturen schneiden sich nicht.

Das Verhältnis aus dem realen Abstrahlwert und dem des Schwarzen Strahlers wird Emissionsgrad ε genannt. ε kann maximal 1 (Körper entspricht dem idealen Schwarzen Strahler) und minimal 0 betragen. Körper mit $\varepsilon < 1$ werden graue Strahler genannt. Körper, deren Emissionsgrad zusätzlich Temperatur- und Wellenlängenabhängig ist, nennt man nichtgraue Strahler.

Die spektrale Emissivität bezeichnet den Teil der Strahlung, die den Körper durch thermische Emission verlässt. Befindet sich ein Körper im thermodynamischen Gleichgewicht, so muss die absorbierte Strahlungsenergie wieder emittiert werden, da sich sonst die Temperatur ändern würde.

Die abgestrahlte Leistung ist bei realen Körpern nicht mehr eindeutig abhängig von der Temperatur des Objektes. Für unterschiedliche Temperaturen und unterschiedliche Wellenlängenabhängigkeiten von ε kann das Integral $R_{\lambda_1, \lambda_2} = \int \varepsilon(\lambda) (dR(\lambda, T) / d\lambda) \cdot d\lambda$ den gleichen Wert liefern. Es ist somit nicht mehr möglich, die Temperatur eines Objektes abzuschätzen, ohne den Verlauf von $\varepsilon(\lambda)$ zu kennen.

Ein weiteres Problem stellt eine mögliche Winkelabhängigkeit dar. Im Falle einer winkelabhängigen spektralen Emissivität $\varepsilon(\delta, \lambda)$ erscheint ein Körper der Temperatur T_0 selbst in einer isothermen Umgebung der Temperatur T_a unterschiedlich hell, wenn er unter verschiedenen Winkeln beobachtet wird.

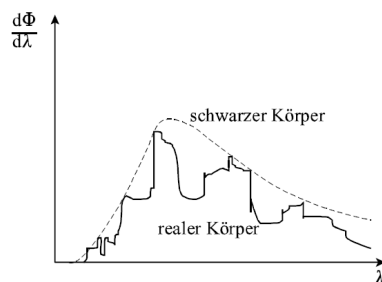


Bild 2: Abb. 1.3 bei [Waller]

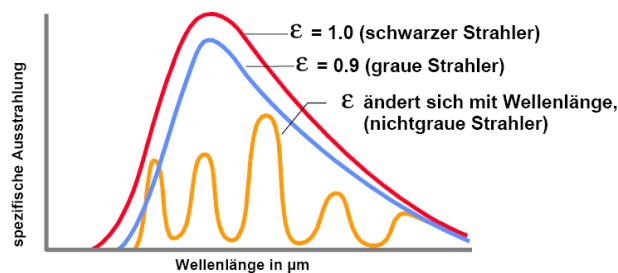


Bild 3: Abb. 5 bei [Gruner]

Diese beiden Bilder sind stellvertretend für viele andere aus der Fachliteratur. Sie stellen die grundsätzliche Eigenschaft von Stoffen dar, dass ε nicht der idealisierten Kurve folgt. Es geht also um die Eigenschaft von realen Körpern bzw. nichtgrauen Strahlern, dass ε veränderlich ist.

Daraus ist zu schlussfolgern: Will man die von einem Körper ausgehende Strahlung bewerten, muss man sie in ihre Wellenlängenanteile zerlegen und man muss die jeweilige Strahlungsleistung bei einer bestimmten Wellenlänge messen. Die praktische Bedeutung erkennt man in Tabelle 7.

Jeder reale Körper besitzt eine geringere Emission als ein schwarzer Körper. Seine Strahlungsverteilung über die Wellenlänge liegt stets unterhalb der Planckschen Strahlungskurve bei gleicher Temperatur. In der Regel ist der Verlauf sehr unregelmäßig verteilt.

ε = Emissionszahl = ein Materialkennwert. Die Beziehung $\varepsilon = \alpha$ gilt nur für den Schwarzen Strahler, d.h. in der Praxis tritt dieser Zustand nicht auf. Praktische Relevanz hat die Gesetzmäßigkeit:

$$\varepsilon = f(T, \lambda, \text{Feuchte, Oberfläche}).$$

Bei niedrigen Temperaturen liegt das Maximum der Strahlung im IR-Bereich (Wärmestrahlung). Die auf der Erde befindlichen Körper besitzen in diesem Wellenlängenbereich ihr Strahlungsmaximum. Wird ein Körper vom Sonnenlicht erhitzt, beginnt er abzustrahlen. Seine Abstrahlung erfolgt im langwelligeren IR-Bereich, sein Strahlungsmaximum lässt sich – je nach Messzeitpunkt – z.B. + 70 °C (Autodach) oder + 10 °C (Außenwand) zuordnen.

Eine praktische Bedeutung des Prinzips „Zustrahlung kurzwelliger – Abstrahlung langwelliger“ lässt sich für das Treibhaus ableiten. Der reale Treibhauseffekt besteht darin, dass das Sonnenlicht die Gewächshauswände durchdringt und drinnen alles erwärmt. Die erwärmten Oberflächen strahlen

dann langwelliger ab und die IR-Strahlung wird von den Floatglasscheiben zurückgehalten – das Resultat ist ein Aufheizeffekt.

Eine weitere praktische Bedeutung des vg. Prinzips ist der Umstand, dass man in einem Altbau mit massiven Wänden und einer Strahlungsheizung eben diesen Effekt hat, dass die IR-Strahlung von den 3- oder 4-mm-Floatglas-Scheiben zurück gehalten werden. Für diesen Fall spielt der U-Wert des Fensters fast keine Rolle mehr.

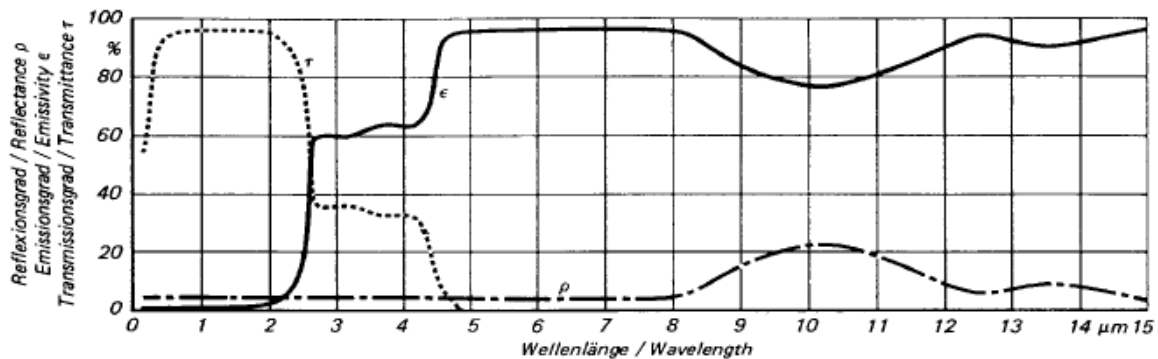


Bild 4: Spektrale Durchlässigkeit von Glas nach [VDI 95]

Bestimmung des Reflexionsgrades

Gemessen wird der gerichtet-hemisphärische Reflexionsgrad $R(\lambda)$ einer Probe. Messgeräte sind das Spektrometer oder die Ulbricht-Kugel.

Informationen zur Ulbricht-Kugel:

<http://www.google.de/search?sourceid=navdi&hl=de&ie=UTF-8&q=ulbricht%2Dkugel>

Ein Standard-Beispiel:

gemessen wird im Wellenlängenbereich λ

- 1,4 μm – 18 μm (IR)
- 250 nm – 2.500 nm (UV/VIS/NIR)

Die Probe wird an der Probenöffnung der Ulbricht-Kugel 8-15° schräg angebracht. Gemessen wird auch der Anteil der spiegelnden Reflexion. Die Daten werden korrigiert, um die Einflüsse der Kugelgeometrie zu berücksichtigen.

Von einer optisch dicken Probe kann ausgegangen werden, wenn sich bei der Reflexionsmessung nur sehr geringe Unterschiede zwischen dem weißen und dem schwarzen Untergrund ergeben.

Für optisch dicke Proben ergibt sich der spektrale Emissionsgrad $\epsilon(\lambda)$ in Näherung aus:

$$\epsilon(\lambda) = 1 - R(\lambda).$$

Aus den spektralen Daten wird durch Integration über das thermische Spektrum bei der Temperatur T der totale Emissionsgrad $\epsilon(T)$ ermittelt:

$$\epsilon(T) = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon(\lambda) e_{bb}(T, \lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} e_{bb}(T, \lambda) d\lambda}$$

e_{bb} ist die Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers

$\epsilon(\lambda)$ ist der der spektrale Emissionsgrad

T ist die Temperatur
 λ ist die Wellenlänge

Die Reflexionsspektren werden mit dem solaren Spektrum bzw. dem thermischen Spektrum bei Zimmertemperatur (295 K = 22 °C) gewichtet. Daraus erhält man den gemittelten Reflexionsgrad für Solarstrahlung bzw. den Emissionsgrad im Infrarot.

Die Messung im IR-Bereich kann nicht nur integral, sondern auch wellenlängenabhängig durchgeführt werden. Daraus ergeben sich Möglichkeiten zur Verbesserung der Farbeigenschaften. Bei der Wichtung mit dem thermischen Spektrum ist zu beachten, dass das Maximum der Wärmestrahlung für Zimmertemperatur bei etwa 10 μm liegt und durch einen relativ niedrigen Reflexionsgrad ein hoher Emissionsgrad bedingt wird.

Ob eine Oberfläche gerichtet oder diffus reflektiert und wie groß der Transmissionsanteil ist, hängt gem. [TU Berlin] von verschiedenen Parametern ab:

- spektrale Zusammensetzung der auftreffenden Strahlung
- Absorptionskoeffizient
- Art des Lichteinfalls
- Schichtdicke
- Oberflächenzustand
- Temperatur

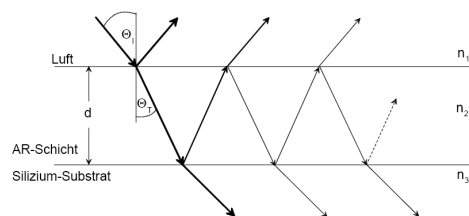


Bild 4: Vielfachreflexionen eines Lichtstrahls an einer Anti-Reflexions-Schicht (AR-Schicht) nach [TU Berlin]

In [TU Berlin] wird die Theorie des Verhaltens elektromagnetischer Wellen an dünnen Schichten wie folgt beschrieben: Die Vielfachreflexionen bei einem System aus zwei Grenzschichten ermöglichen die Minimierung des reflektierten Wellenanteils (Abb. 1). Eine Summation der Reflexionsgrade für jeden einzelnen Brechungsvorgang liefert unter Berücksichtigung der Phasendicke den Wert für R. Wird der Brechungsindex n an allen Stellen durch den komplexen Brechungsindex N ersetzt, ist auch die Absorption mit berücksichtigt. Bei senkrechtem Einfall ist eine Unterscheidung zwischen senkrecht und parallel zur Einfallsebene polarisierendem Licht nicht notwendig.

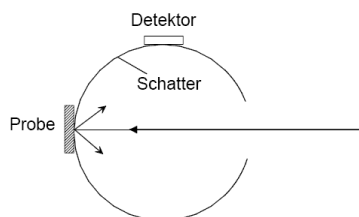


Bild 5: Abb. 7, Messanordnung der Ulbrichtkugel für Reflexionsmessungen in [TU Berlin]

Die oben geschilderte Theorie bezieht sich auf so genannte AR-Schichten (Anti-Reflexions-Schichten, Bsp.: Reflexion auf einer Solarzelle vermindern), bei denen nicht für jedes Material eine Nullstelle erreichbar ist. Reflexionsfreiheit für eine bestimmte Wellenlänge ist nur für Materialien mit der Brechzahl $n_2 = (n_1 \cdot n_3)^{1/2}$ möglich. (n_2 – Brechzahl der AR-Schicht, n_1 – Brechzahl von Luft, n_3 – Brechzahl des Substrats).

In der Auswertung soll nach [TU Berlin] für jede Probe eine grafische Darstellung des spektralen Reflexionsgrades in Prozent über der Wellenlänge erfolgen, dazu eine Bewertung der Ergebnisse und eine Ermittlung des Reflexionsgradminimums und der Dicke der Schicht erfolgen, soweit dies möglich

ist. Die Messwerte mittels Integral auf einen Wert herunter zu brechen, scheint man hier für unzweckmäßig zu halten.

Theoretisches aus der Welt der Wissenschaft

„Wärme- und Schallschutz von und in Gebäuden zur Energieeinsparung und zum Schutz gegen sommerliche Überhitzung vor allem bei modernen Glaskonstruktionen stellen hohe Anforderungen an Dämmstoffe und wämedämmende Bauteile. Der Markt dieser Bauprodukte ist hart umkämpft und neue Produkte mit Infrarot-reflektierenden Schichten oder Oberflächen zur Wärmedämmung werden angeboten. Sind diese als vollwertige Dämmung anerkannt? Welche Aussagen macht die baurechtliche Zulassung und im Vergleich dazu die Werbung? Erfahrungen aus Forschung und Baupraxis werden an konkreten Fallbeispielen vorgestellt und für die Anwendung erläutert.“
[SOBIC 2003]

Dies war das Leitmotiv eines Seminars am in Deutschland führenden Institut auf dem Gebiet der Bauphysik. Zunächst mag mancher vermuten, dass hier die Wärmetransportformen Leitung und Strahlung durcheinander gebracht werden, aber schauen wir erst mal, mit welchen Erfahrungen aus der Forschung aufgewartet wird.

Stoffparameter	Hersteller	PTB	Vergleich	Tabelle
Wärmeleitfähigkeit in W/mK	0,000152 (Rechenfehler?)	0,265	0,316 [Calcoast]	Farbe auf Harzbasis
k - Wert (Dicke: 0,25 mm) in W/m ² K	0,608	1260		Gipskarton
Wärmedurchgangskoeffizient in m ² K/W		0,9	0,9 [Hauser]	
spektr. Emissionsgrad		0,9		Acrylharz-Farbe
Gesamtemissionsgrad		0,9	0,9 [Hauser]	Acrylharz-Farbe, weiß

Bild 4: Ausschnitt aus der PTB-Folie 3 (2003) bzw. 7 (2004) in [Hammerschmidt 03] und [...04]

Anhand dieser Zusammenstellung von Materialkennwerten unterschiedlicher Herkunft wird der kühne Schluss gezogen, dass „keine thermische Wirkung“ zu attestieren sei. Wer sich fragt, wie man auf die Werte für λ und ε kommt, kann dies in Bauphysik 22, 124-129 (2000) nachlesen, wo der Bericht von U. Hammerschmidt und W. Sabuga über „Messungen thermischer Eigenschaften einer Thermobeschichtung für den baulichen Wärmeschutz“ veröffentlicht wurde.

Dieser Klassiker scheint von so fundamentaler Bedeutung zu sein, dass er ein Jahr später wieder zum Besten gegeben wird. Die Vortragsfolie der PTB wurde immerhin von 13 auf 26 Seiten erweitert. Allein der plakative Aufdruck „keine thermische Wirkung“ scheint Beweis genug zu sein. Wofür taugen die angegebenen Werte für Wärmeleitfähigkeit und Emissionsgrad?

Die Frage ist hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit recht einfach zu beantworten. Da eine Außenwand im Bestand eher nicht aus einer Gipskartonschale besteht, kann man von einer 36,5er Mauerwerkswand als repräsentativem Beispiel ausgehen. Hier ist es nun fast egal, mit welchem λ -Wert für ThermoShield man heran geht: 40, 20, 4, 2, 0,4 oder 0,2 – das ist egal, am Ende ist der U-Wert dieser Wand effektiv unverändert, wenn man nach dem herkömmlichen U-Wert-Schema denkt und rechnet.

Festzustellen ist, dass hier kein Produktname aufgeschrieben steht, jedoch wird er mündlich verwendet und für den Eingeweihten (z.B. im Seminar eingeweiht) ergibt sich aus dem Hinweis auf Calcoast Analytical und den berühmten Umrechnungsfehler ein gewisser Bezug. Für ThermoShield ist festzuhalten, dass das leidige Thema des U-Wertes abschließend in dem kleinen Fachartikel „Warum die herkömmliche U-Wert-Rechnung bei ThermoShield® nicht funktionieren kann“ abgehandelt ist. Die Zusammenhänge sind hier so anschaulich erklärt, dass sich weitere Ausführungen erübrigen.

ρ : Reflektionsgrad	$\rho = 1$	$\rho = 0$
α : Absorptionsgrad	$\alpha = 0$	$\alpha = 1$
ε : Emissionsgrad	$\varepsilon = 0$	$\varepsilon = 1$
	$\varepsilon = \alpha$	

Bild 5: Relation zwischen Absorption und Emission bei [Hammerschmidt 2004]

In Bild 2 ist eine kühne Konstruktion dargestellt: ε wird $= \alpha$ gesetzt, ohne darauf einzugehen, dass diese Beziehung immer nur für einen bestimmten Wert der Wellenlänge gilt und ohne darauf einzugehen, dass α (solar) und ε (IR) eines Körpers unterschiedliche Werte haben können.

Daraus lässt sich dann auch die Abhängigkeit herleiten, dass mit einem höheren α auch ε größer wird. Als Modell für bestimmte Rahmenbedingungen (thermodynamisches Gleichgewicht nur aus Strahlung und Emissivität wellenlängenunabhängig) mag dies etwas taugen, ein praktischer Bezug besteht nicht.

Erstaunlicherweise wird Glas ein selektives Verhalten hinsichtlich der Wellenlängen attestiert (Folie 22) und auf Folie 23 wird gar verkündet: „Aktuelle IR-reflektierende Oberflächen vermindern die Emission infraroter Strahlung um bis zu 60%.“ [Hammerschmidt 2004] Auch wenn die Grundlagen verdreht dargelegt werden, kann man einen gewissen Wahrheitsgehalt attestieren.

Allerdings wäre noch ein Definitionsproblem auszuräumen, indem der Begriff „IR-reflektierende“ Oberflächen geklärt wird. Denn grundsätzlich ist festzustellen, dass zwischen dem Absorptions- und dem Emissionsverhalten einer Stoffoberfläche kein Zusammenhang bestehen muss – es sei denn man bildet stark vereinfachende Randbedingungen, um dann zwangsläufig zu den falschen Schlüssen zu gelangen.

Messpraktisches, Teil 1: Laborwerte

Ein für die Bestimmung der Emissionseigenschaften geeignetes Verfahren ist die Messung mit der Ulbricht-Kugel über ein weit gefächertes Wellenlängenspektrum. Erstaunlicherweise gelangen alle bisherigen Messungen zu dem Ergebnis, dass die hemisphärisch gerichtete Reflexion $\rho_e = \sim 0,84$ beträgt und für ε kommt man auf 0,90...0,95. Dies verdeutlicht die folgende Tabelle.

Prüfstelle	Datum	Probe	ε_T	ρ_e	Bereich	μm
DSET	19.12.1989	ThermoShield Top Coat		0,82	UV-NIR	0,3 - 2,5
TNO Delft	23.06.1993	ThermoShield auf Kupferplatte		0,84	NIR	0,25 - 2,5
MPA Braunschweig	01.09.1994	ThermoShield Top Coat			NIR-IR	0,6 - 4,0
i.f.t. Rosenheim	29.01.1997	ThermoShield Interieur auf Gipskarton	0,90	0,82	NIR	0,28 - 2,5
ZAE Bayern, Würzburg	21.10.1997	ThermoShield Interieur auf Raufaser	0,95	0,84	NIR, IR	0,3 - 18,0
ZAE Bayern, Würzburg	14.04.1998	ThermoShield Interieur auf Kontrastkarton	0,95	0,84	IR	1,4 - 18,0
ORNL Tennessee	30.04.2000	ThermoShield Clear Coat auf Dachfläche	0,90	0,70	solar	k.A.

Tabelle 6: Zusammenstellung der bisherigen Messergebnisse nach [SICC]

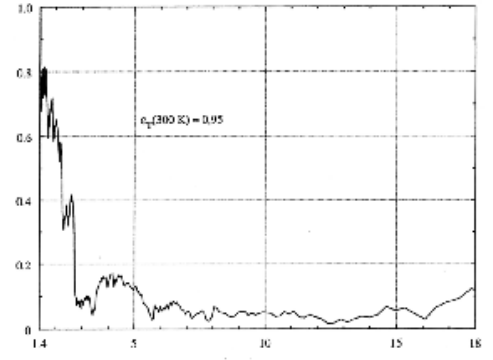
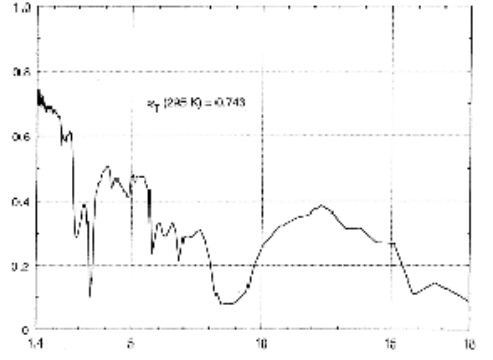
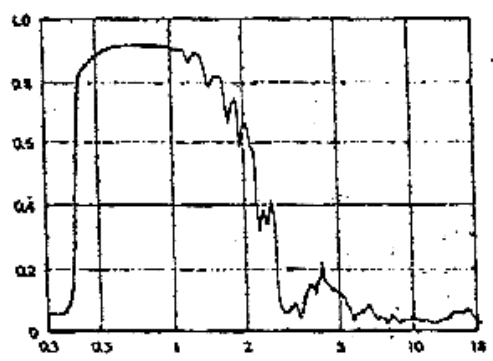
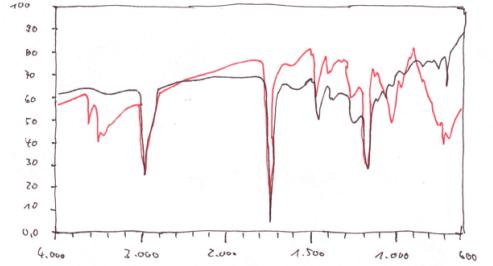
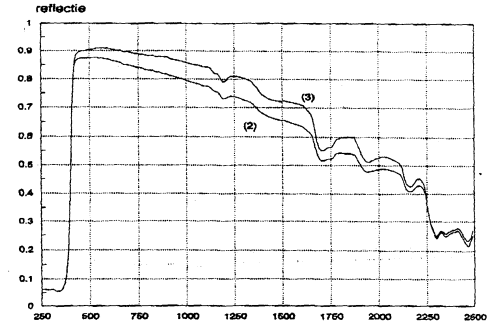
	<p>Figur 1: gerichtet-hemisphärischer Reflexionsgrad von Thermo Shield Interieur® die Wellenlänge λ reicht hier von 1,4 μm bis 18,0 μm $\varepsilon_T(300\text{ K}) = 0,95$</p> <p>Quelle: Die Würzburger Messung vom 20.04.1998 (© SICC GmbH, 28.09.2004, dib)</p>
	<p>Figur 2: gerichtet-hemisphärischer Reflexionsgrad von Thermo Shield Thermocolor® die Wellenlänge λ reicht hier von 1,4 μm bis 18,0 μm $\varepsilon_T(295\text{ K}) = 0,743$</p> <p>Quelle: Die Würzburger Messung vom 20.04.1998 (© SICC GmbH, 28.09.2004, dib)</p>
	<p>Figur 3: gerichtet-hemisphärischer Reflexionsgrad von Thermo Shield Interieur® die Wellenlänge λ reicht hier von 0,3...1,4...18,0 μm $\varepsilon_T(295\text{ K}) = 0,95$</p> <p>Quelle: Die Würzburger Messung vom 20.04.1998 (© SICC GmbH, 28.09.2004, dib)</p>
	<p>Figur 4: gerichtet-hemisphärischer Reflexionsgrad von Thermo Shield TopCoat behandelt / unbehandelt (4,0...0,6 μm)</p> <p>Quelle: Prüfzeugnis MPA Braunschweig Nr- 6182/3414- He (14.12.1554)</p>
	<p>Figur 5: Bild 1: Ø Reflexionsgrad als Funktion der Wellenlänge von 3 ThermoShield® - Proben Legende: (2) 2 Schichten ThermoShield® aufgetragen, (3) 3 Schichten ThermoShield®</p> <p>Quelle: Die Delfter Messung vom 23.06.1993 (© SICC GmbH, 30.09.2004, dib)</p>

Tabelle 7: Zusammenstellung einiger Grafen für $\varepsilon = f(\lambda)$, siehe auch Tabelle 6 nach [SICC]

Beim aufmerksamen Lesen der Tabelle stellt man fest, dass es sich um fast identische Werte handelt bzw. dass die Abweichungen nicht groß sind. Die signifikante Abweichung betrifft die ORNL-Messung (letzte Zeile), wo man den Spektralbereich auf den solaren Bereich erweiterte.

Das Problem liegt nicht in der Messmethode (Ulbricht-Kugel, vergl. Beschreibung oben), sondern in der Wertung der Ergebnisse. Über die Intergration scheint man stets auf die gleichen Ergebnisse zu kommen, egal wie der Kurvenverlauf im Einzelnen aussieht.

Zunächst sei davon auszugehen, dass man jeweils den gleichen Bereich des Spektrums heran zieht. Selbst wenn dies nicht das Kardinalproblem darstellt, würde eine bessere Vergleichbarkeit hilfreich sein. Unabhängig davon lohnt eine Betrachtung der Kurvenverläufe.

Eingangs wurden die theoretischen Grundlagen für $\varepsilon = f(\lambda)$ dargelegt, wobei aber auch schon die praxisrelevante Beziehung $\varepsilon = f(T, \lambda, \text{Feuchte, Oberfläche})$ erwähnt wurde.

In Tabelle 7 sind einige Beispiele für gemessene Kurvenverläufe dargestellt. Abgebildet ist jeweils der hemisphärische Reflexionsgrad bezogen auf die Wellenlänge. Wie eingangs erwähnt, ist der Bereich um die $10 \mu\text{m}$ von besonderem Interesse. Ein Vergleich der Kurvenwerte eben bei diesem Wert von $10 \mu\text{m}$ zeigt deutliche Unterschiede, ebenso wird erkennbar, dass eine Materialveränderung deutliche Unterschiede im Reflexionsverhalten nach sich zieht.

Oben wurde der Zusammenhang erläutert, dass ein Körper kurzwellig absorbiert (VIS, solar), aber langwellig emittiert (IR). Insofern drängt sich die Frage auf, ob es legitim ist, einem Stoff, der im solaren Bereich gute Reflexionseigenschaften hat und dessen Reflexion im IR-Bereich bedeutend niedriger ist (und weil ρ klein, folgt α hoch und ε hoch), in der integrierten Ausrechnung einen hohen Emissionswert zuzuschreiben.

Aus diesen Betrachtungen geht hervor: je mehr man vereinfacht und Faktoren weglässt, umso mehr egalisiert man die Ergebnisse und um so mehr entfernt man sich vom praktischen Bezug. Es kann nicht egal sein, ob ρ bei $\lambda = 10 \text{ mm}$ nun 0,05 oder 0,3 beträgt (siehe Tabelle 2, Figuren 1 und 2).

Weiterhin ist oben in den Grundlagen ausgeführt, dass die absorbierte Strahlungsenergie wieder emittiert werden muss, da sich sonst die Temperatur ändern würde, wenn sich ein Körper im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Nun sei der praktische Bezug hergestellt, indem die Frage untersucht wird, ob und wann sich eine Außenwand im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Umgebung befindet.

Baupraktisches

Innerhalb des Wandbaustoffes wird Energie nach außen transportiert, das geschieht in Form der Wärmeleitung. Bei genauer Betrachtung gibt es bei porösen Stoffen auch noch einen Strahlungsanteil. An der Wandoberfläche kommt es zu einer Übergabe der hierhin gelangten Energie, dies geschieht mittels Strahlung und konvektiven Abtrags, indem die Luftmoleküle Wärmeenergie aufnehmen.

In der Heizperiode liegt die Wandoberflächentemperatur meist über der Umgebungstemperatur. Netto strahlt die mit der Umgebung im Strahlungsaustausch befindliche Wand also an die Umgebung ab, dazu kommt der Verlustanteil aus Konvektion. In diesem Zusammenhang kommt auch die bereits oben erwähnte Strahlungslufttemperatur ins Spiel. Sie enthält ebenfalls die Emission.

$$\theta_a^* = \theta_a + (\alpha_s \cdot I_s - \varepsilon \cdot \Delta I_R) / h_a$$

mit

θ_a Aussenlufttemperatur in $^{\circ}\text{C}$

α_s solarer Absorptionsgrad

I_s Solarstrahlungsintensität in W/m^2

ε Emissionsgrad der Oberfläche

ΔI_R Infrarotstrahlungs-Zusatzverlust an den klaren Himmel in W/m^2

h_a Wärmeübergangskoeffizient aussen in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

So lässt sich z.B. erklären, dass man bei etwas unter 0 °C auf + 35 °C Wandoberflächentemperatur kommt. Bei einer Massivwand sind es sogar + 45 °C, was auf den Einfluss der Speichermasse zurückzuführen ist. Dies haben Messungen der EMPA 1992 ergeben.

Daraus wurden als Maßnahmen gegen eine Unterkühlung vorgeschlagen: Vordach (Abschirmung gegen den klaren Himmel), Speichermasse (Massive Bauweise) und low-e Schicht auf der Außenseite. [EMPA 92]

Ganz offensichtlich bestehen Unterschiede, wenn man einen Materialkennwert im Labor bestimmt und wenn man die Ergebnisse von Wirkmechanismen in praxi bestimmt. An dem einen Materialkennwert liegt es sicher nicht, nur mangelnde komplexe Betrachtung und das Ziehen falscher Schlüsse daraufhin sind die Ursache.

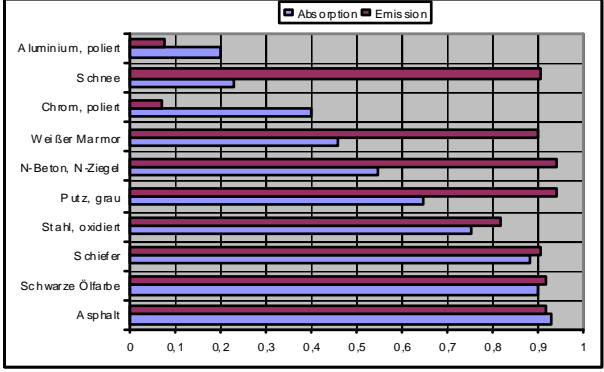
Ein thermodynamisches Gleichgewicht liegt niemals vor, es wird allerdings angestrebt. Aufgrund der dynamischen Vorgänge stellt sich dieser Zustand niemals ein, das kann man nur im Labor erreichen, indem man stark vereinfachend Faktoren weglässt.

Bei der Außenwand wirken neben dem Strahlungsaustausch gleichzeitig die Faktoren Wärmeleitung und Konvektion. Wärme fließt nach außen zum Kälteren ab und Windbewegung reißt konvektiv Wärme mit sich und von der Wandoberfläche weg. Dass vereinfachende Ansätze nicht praxistauglich sind, hat man auch im Fraunhofer IBP festgestellt, wie im nächsten Absatz deutlich wird.

„In den Wärmeübergangskoeffizienten ist ein Anteil enthalten, der den langwelligen Strahlungsaustausch berücksichtigt. Dieser Ansatz ist jedoch nur gültig, solange der konvektive und der strahlungsbedingte Wärmefluss gleichgerichtet sind. Bei der nächtlichen Unterkühlung hochgedämmter Bauteile ist dies nicht mehr der Fall. Für Berechnungen der nächtlichen Betauung solcher Bauteile ist deshalb eine Korrektur der Übergangskoeffizienten oder eine Kompensation durch Anpassung der langwelligen Emissionszahl im Vergleich mit experimentellen Ergebnissen notwendig.“ [Fraunh IBP WUFI]

Diese Aussage ist wahr und beachtlich ist der Umstand, dass man den Begriff der „Anpassung der langwelligen Emissionszahl“ ins Spiel bringt. Die Motivation mag darin begründet sein, dass es hierbei um das bessere Hinrechnen bei Wärmedämmstoffen geht. In [Hammerschmidt 03] und [...04] geht man mit der Emissivität viel kulanter und laxer um.

	Absorption gegenüber solarer Strahlung	Emission bei irdischen Oberflächentemperaturen
Asphalt	0,93	0,92
Schwarze Ölfarbe	0,90	0,92
Schiefer	0,88	0,91
Stahl, oxidiert	0,75	0,82
Putz, grau	0,65	0,94
N-Beton, N-Ziegel	0,55	0,94
Weißer Marmor	0,46	0,90
Chrom, poliert	0,40	0,07
Schnee	0,35...0,20	0,91
Aluminium, poliert	0,20	0,08



Grafik zu den Tabellenwerten

Tabelle 8: Absorptions- und Emissionswerte versch. Stoffe nach [Siebel 01]

Die in der Tabelle angegebenen Werte sind mittlere Werte über λ von ca. 0,3 ... 3 μm für die Strahlungsabsorption im kurzwelligeren Bereich und über λ von 3 ... 30 μm Strahlungsemission im längerwelligen Bereich. Auffällig hier wieder das „Phänomen“, dass bei einigen Stoffen bei nahezu gleichem ε die Werte für α deutlich differieren.

Da es ein stoffabhängiges Emissions- und Absorptionsverhalten gibt, wird über die Wellenlänge unterschiedlich ausgesendet und empfangen. Zudem werden die Verhältnisse durch die Einstrahlungswinkel verändert.

Messpraktisches Teil 2: in situ & analytisch

Befasst man sich in praktischen Situationen mit den Eigenschaften ThermoShield beschichteter Wände, scheinen meist andere Ergebnisse heraus zu kommen, als bislang in Form von Laborergebnissen vorgetragen. Hierzu sei als erstes Beispiel [Minsk 05] genannt, zu welchem hier berichtet werden soll.

Zur Berechnung der Temperaturzustände des Innenraumes wurde ein physikalisch-mathematisches Modell als System von Differentialgleichungen aufgestellt. Neben Wärmeleitzahl, Wärmekapazität und Stoffdichte enthält das Modell ein als ϵ_{eff} bezeichneten Wert (reduzierte Potenz des Schwarzstrahlers für die Umfassungskonstruktion).

Für die Berechnungstemperaturen der Außenwandinnenseite wurden noch andere Varianten bestimmt $\lambda\epsilon$ mit 0,65/0,75, 0,72/0,75, 0,75/0,75, 0,81/0,90. Dann wurden Prüfungen zur Fehlerbestimmung zwischen Messung und Berechnung durchgeführt. Das Minimum wurde für Werte bei $\lambda = 0,72$ und $\epsilon = 0,75$ ermittelt.

Mit einem speziell entwickelten Computerprogramm wurde eine Analyse für die Ergebnisse der Lösung der Wärmeleitfähigkeitsgleichung zusammen mit den Feuchteausstauschvorgängen für eine 51 cm starke Mauerwerkswand für einen 5-Jahres-Zeitraum durchgeführt. Dabei wurden statistische Wetterdaten angesetzt sowie als w-Werte für den Putzmörtel 5,4 und für ThermoShield 0,035 [$\text{kg} / \text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$].

Das Programm ist eine Modifizierung einer Gleichung, in der die Wärmeleitfähigkeit von der Umgebungsfeuchte und der Niederschlagszahl abhängt. Das Ergebnis ist in einer Grafik dargestellt, wobei die obere Kurve für die mit ThermoShield beschichtete Wand steht und die unteren Kurven für die unbeschichtete Wand mit 2, 4 und 6 M.-% ThermoShield verhindert eine Verschlechterung des Wärmewiderstandes der beschichteten Wand.

Der Effekt der Verbesserung des Wärmewiderstandes der Wandkonstruktion ist auf deren Austrocknen zurückzuführen. Dazu wird festgestellt, dass die Simulationsergebnisse gut mit den Messdaten des WFA-Institutes vom 02.04.2001 korrelieren. Die Wärmedämmwirkung wird auf die gute Dampfdurchlässigkeit und den Feuchteschutz der ThermoShield-Beschichtung zurückgeführt.

In der Zusammenfassung werden zwei wesentliche Ergebnisse aufgezeigt:

- 1. hat sich λ auf einen Wert von $\sim 0,72 \text{ W/mK}$ eingestellt und**
- 2. liegt ϵ bei $\sim 0,75$.**

Das Monitoring hat eine Verringerung von λ um 11% infolge der Reduzierung der Betriebsfeuchte gezeigt, was einer Verbesserung des Wärmewiderstandes um 12% entspricht. Zugleich konnte eine Erhöhung des Wärmeübergangswiderstandes der Wand infolge reduzierter Abstrahlung festgestellt werden, ΔR_T wird mit 19% angegeben.

Da oben Bezug auf Messdaten des WFA Institutes genommen wird, sei an dieser Stelle aus der Bauphysikalischen Stellungnahme [WFA 01] zitiert:

„Die Bauteilfeuchte der Wände, 5 cm unter der äusseren Oberfläche, hat kontinuierlich abgenommen, mit einer Wasserdampfaktivität in den Baustoffporen von anfangs 90 % r.F. bis derzeit etwa 74 % r.F.

...

Die Temperatur im Wandinneren, 5 cm unter der äusseren Oberfläche, lag häufig deutlich über der Temperatur, welche sich aufgrund der innen und aussen anliegenden Klimata hätte ergeben müssen.

...

Die Temperaturen an der Aussenoberfläche der Wände sind deutlich geringer als die Temperaturen der Außenluft,

...

Die niedrigen Oberflächentemperaturen führen dazu, dass die Wandoberflächen in dieser Zeit keine Wärme an die Aussenluft abgeben, sondern von der Aussenluft erwärmt werden. D.h. die Wärmeabgabe durch Wärmestrahlung (Infrarot) wird teilweise oder ganz durch Wärmekonvektion von der Aussenluft gedeckt.“

Auch hier stößt man auf die Beobachtung, dass der konvektive Wärmeeintrag den Verlust aus Emission im IR überwiegt.

Zu ähnlichen Ergebnissen gelangt man in [WAT 04]. Hier wird eine analytische und zahlenmäßige Analyse des Problems der 'Dicke-Effekt-Kurve' in halbtransparenten Medien behandelt (z.B. Baumaterialien, bei denen die Wärmeübertragung gleichzeitig durch Ausstrahlung und Leitung stattfindet). In der ersten Stufe der Untersuchungen führen die Verfasser Ergebnisse für den Idealfall „schwarzer Strahler“ auf.

In der zweiten Stufe wird eine realistischere Situation und ein in der Technik wichtigerer Fall behandelt, wobei die mit Thermo-Shield'-Anstrichen beschichteten Oberflächen graue und streuende Reflektoren sind. Das Modell berücksichtigt die optischen Eigenschaften der "Thermo-Shield'-Überzüge, d.h. das hohe Reflexionsvermögen. Zur Bestätigung der Methode wurden die Ergebnisse der analytischen Lösung mit der genauen Lösung des 1-dimensionalen, kombinierten Modells für Strahlung und Leitung bei der Wärmeübertragung in einem emittierenden und absorbierenden Medium verglichen.

Man gelangt hier zu der Schlussfolgerung: „Der physikalische Mechanismus der Wärmedämmung durch die Thermo-Shield'-Überzüge in Verbindung mit dem niedrigen Emissionsvermögen dieser Überzüge ist direkt von der Form der Funktion für die Dichte des Ausstrahlungshitzefflusses $\dot{q}_r(l)$ sowie von der Position des Maximums dieser Funktion abhängig. Das Maximum von $\dot{q}_r(l)$ im Falle von Luft und der Wand eines Innenraumes wirkt als wärmedämmende Sperre. Dies ist mit einem so genannten Wärmekomfort in einem Gebäude verbunden, da der Temperaturanstieg sich einer Wand mit niedrigem Emissionsvermögen nähert.“

Von besonderem Interesse dürften die Ausführungen zum Emissionsvermögen sein: „Unserer Auffassung nach kann durch 'Thermo-Shield'-Überzüge mit niedrigem Emissionsvermögen ein Emissionsvermögen des untersuchten Mediums, z.B. Baustoffen, Metallen, Kunststoffen, Schaumstoffen auf 0,62 oder sogar 0,53 [6] verringert werden. Zum Beispiel wurde durch das Fraunhofer Institut für Bauphysik in Stuttgart (Deutschland) das Emissionsvermögen einer Ziegelwand als 0,62 bei reflektierenden Wänden oder sogar als 0,53 bei stark reflektierenden Wänden [6] angenommen.“

Das anscheinend fehlende Bindeglied zwischen theoretischen Erkenntnissen und praktischen Ergebnissen findet man in [Shnir 03]: „Die Streuung von Infrarot- (IR) oder Wärmestrahlung ($\lambda=0,7-75\mu\text{m}$) auf Kugeln mit einem Durchmesser von $0,001-100\mu\text{m}$ kann die Wärmeübertragung in der Schicht wesentlich beeinflussen. Wie oben festgestellt wurde ist in diesen Fällen für eine korrekte umfassende Beschreibung des Prozesses der Wärmeübertragung durch Strahlung die zusätzliche Verwendung der Integral-Differential-Gleichung für die Wärmeübertragung erforderlich, deren Lösung von den optischen Eigenschaften eines Elementarvolumens der Schicht abhängig ist, d.h. σ_λ , χ_λ und $p_\lambda(\mu, \mu')$. Diese Eigenschaften werden durch die Größe der Kugeln (im einfachsten Fall handelt es sich bei einer idealen Kugel um den Radius a), den Abstand zwischen den Kugeln d , den komplexen Brechungsindex des Stoffes und der Kugeln sowie die Wellenlänge der gestreuten Strahlung bedingt. Außerdem ist es erforderlich, die Dispersion des Brechungsindex zuzulassen, d.h. dessen Abhängigkeit von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung.“

Auch ist in [Shnir 03] von ganz anderen Werten die Rede, als oben in Tabelle 6 aufgeführt: „Das effektive Emissionsvermögen des Verbundstoffes ist eine komplexe Funktion der geometrischen Dicke der Verbundstoffschicht, den Abmessungen und der Konzentration der Mikrokugeln, der Temperatur und dem Emissionsvermögen der Wand, auf der sich der Verbundstoff befindet, und den äußeren Einstrahlungsbedingungen des Verbundstoffes, wie z.B. der Lufttemperatur, Wolken, Vorhandensein anderer strahlender Objekte (Sonne, nahe Gebäude, usw.). Zum Beispiel ist das effektive Emissionsvermögen für die in Abb. 5 aufgeführten Ergebnisse annähernd gleich 0,4 und sinkt bei bewölktem Himmel (wobei alle anderen Parameter unverändert bleiben) auf 0,3. Diese wirksame Eigenschaft verringert sich auch bei einem Temperaturrückgang zwischen der Wandoberfläche und der Umgebungsluft.“

Es besteht demnach ein enger Zusammenhang zwischen dem Wirkanteil von ThermoShield, der in den Unterlagen [SICC] als „Scattering“ bezeichnet wird und dem Emissionsverhalten. Die wissenschaftliche Abhandlung [Shnir 03] steht auf der Internetseite der SICC GmbH online, weswegen sie hier nicht weiter zitiert werden soll.

Praktische Bedeutung

Neben den genügend beschriebenen und dokumentierten Einsparmöglichkeiten an Heizenergie [SICC], die zu einem beträchtlichen Anteil auf das Scattering und auf das Emissionsverhalten von ThermoShield zurückzuführen sind, gibt es noch andere Vorteile in der praktischen Anwendung.

Neben der Tauwasserproblematik und der Anfälligkeit für Algen, Pilze und Mikroorganismen gibt es noch einen Schwachpunkt bei WDVS, den Planer und Ausführende zu beachten haben, es sind Hellbezugs-Grenzwerte zu berücksichtigen: ≥ 20 bei organisch gebundenem Putz und bei Silikatputz, ≥ 30 bei Mineral-Leichtputz.

Der Hellbezugswert ist der Reflektionsgrad eines bestimmten Farbtons zwischen Schwarz = 0 und Weiß = 100. Er gibt an, wie weit der betreffende Farbton vom Schwarz- oder Weißpunkt in seiner Helligkeit entfernt ist. In Farbfächern wird der Hellbezugswert neben der Farbnummer angegeben.

Die praktische Bedeutung der hervorragenden Produkteigenschaften von ThermoShield beinhaltet u.a. auch die Komponente der planerischen Freiheit. Man muss sich keine Gedanken über den Hellbezugswert machen, wenn man ThermoShield einsetzt. Je nach Gusto genügt die Qual der Wahl aus dem Farbfächer – hier stehen alle Möglichkeiten offen.

Die Lösung des Problems liegt bei ThermoShield in den in der Gebrauchsmusterschrift beschriebenen endothermischen Effekten®. Wenn Sie einen beliebig kräftigen, also dunklen, Farbton an der Fassade haben und ThermoShield die thermischen Belastungen heraus nimmt, wird das weniger am Reflexionsvermögen liegen - das kann sich jeder gut vorstellen, dass ein dunkles Blau wenig reflektiert, wenn man allein auf den Pigmentanteil abstellt.

Es geht auch nicht allein darum, dass ThermoShield eine hoch resistente Membran darstellt und dabei jedem Vergleich mit hochwertigen Putzen bzw. Farben standhält. Der Name wäre völlig irreführend, wenn ThermoShield nicht auch tatsächlich ein Wärmeschild wäre. Dass Keramik die entsprechenden isolierenden Eigenschaften hat, ist allgemein bekannt.

Die beigemischten vakuumisierten Keramikkügelchen in ThermoShield sind das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zu herkömmlichen Farben. Sie bewirken nicht nur den so genannten Thermoskanneneffekt, sondern es kommt noch ein Wirkanteil aus dem Bereich der optischen Physik dazu, der unter „It works“ beschrieben ist. Die Summe der Wirkanteile ist es, die ThermoShield zu einem vorteilhaften Beschichtungssystem macht.

Auf die Bedeutungslosigkeit des Hellbezugswertes verweist der Hersteller übrigens in seinem Hauptprospekt. Die praktischen Erfahrungen warten aber noch mit einer Steigerung auf: es sind Farben mit einem Hellbezugswert nahe 0 möglich. HBW = -0 bedeutet: schwarz.

Die Belege dafür sind z.B. das Schwarze Haus in Holland (7 Jahre) oder die von Malermeister Fuchs in Konstanz beschichteten geputzten Giebelflächen, bei denen sich trotz der schwarzen Farbe auf der Putzfassade seit 5 Jahren keine Risse zeigen. Andere Beispiele sind die im Prospektmaterial abgebildeten Tanks, wo ThermoShield auch in kräftigen Grün- und Blautönen appliziert wurde.

Sie können also Putzfassaden und WDVS gleichermaßen sanieren und a priori schützen, auch wenn Sie ThermoShield in kräftigen Farbnuancen wählen. Bauteilverformungen aus Aufheizung werden verhindert, die Art und Höhe der farbigen Pigmentierung spielen bei ThermoShield keine Rolle. Der andauernden Wechsel zwischen Erwärmung durch Sonneneinstrahlung und Abkühlung während der Nachtstunden werden bei einer mit ThermoShield beschichteten Fassade die Temperaturspannungen eliminiert, so dass es zu keiner Rissbildung kommt.

(Ergänzungen vorbehalten)

Literatur

- [EMPA 92] Klimatische Einflussgrößen; Th. Frank, Abteilung Bauphysik, ETHZ Spezialfragen der Bauphysik 17.1.03 / Frank / 1-15
- [Fraunh IBP WUFI] Software / WUFI / Grundlagen / Überblick über WUFI; Feuchttransport durch Bauteile, Rechnerische Simulation mit Hilfe des Modells WUFI; <http://www.hoki.ibp.fhg.de/wufi/grundl/ueberblick>
- [Gruner] Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung "Strahlungsthermometrie", Dr.-Ing. Gruner, Raytek Europazentrale, Raytek GmbH, Berlin
- [Hammerschmidt 03] Wärmeübertragung bei Sommerhitze und Frostnächten in Bauteilen mit IR-reflektierenden Folien oder "Thermo-Beschichtung", Dr. Ulf Hammerschmidt, PTB Braunschweig, 13 S.
- [Hammerschmidt 04] Wärmeübertragung bei Sommerhitze und Frostnächten in Bauteilen mit IR-reflektierenden Folien oder "Thermo-Beschichtung", Dr. rer. nat. Ulf Hammerschmidt, PTB Braunschweig, 26 S.
- [Minsk 05] V.P. Nekrasau, I.P. Witjas, L.M. Mjakinnik: Bericht: Zusammenfassung von Ergebnissen eines durchgeführten Monitorings des Objektes Hotel "Minsk" zum Programm von Wärmebild- und Kontaktmessungen für Umfassungskonstruktionen und Vorbereitung eines Berichtes anhand der Monitoringergebnisse, staatl. Institut NIPTIS, Minsk, 05.2005
- [Shnir 03] J. Shnir: Mathematische Modellierung der Wärmeschutzeigenschaften des aus hohlen Keramik-Mikrokugeln bestehenden Verbundüberzugs ("Thermo-Shield"), 08.2003
- [SICC] Referenzen und Datenmaterial zum Produkt ThermoShield, von verschiedenen Stellen, aus mehreren Jahren, SICC GmbH ThermoShield Europe, Berlin
siehe unter: www.thermoshield-europe.com oder www.sicc.de
- [Siebel 01] Banalitäten-Handbuch Bauphysik, Prof. Dr.-Ing. L. Siebel, FH Aachen, W-GL-3, 05/01
- [SOBIC 03] Fachseminar Wärmeschutz mit IR-reflektierenden Folien oder Beschichtungen? Anforderungen an neue Baustoffe aus Zulassungen und EnEV; Fraunhofer IBP, 12. November 2003

- [TU Berlin] TU Berlin, Institut für Hochfrequenz- und Halbleiter-Systemtechnologien, Fachgebiet Halbleiterbauelemente, Photovoltaik-Praktikum, Versuch P4: Vermessung der spektralen Reflexion von Oberflächen mit der Ulbrichtkugel
- [VDI 95] VDI/VDE Richtlinie, Technische Temperaturmessungen - Strahlungsthemometrie, Januar 1995, VDI 3511 Blatt 4
- [Waller] Beleuchtungstechnik, Vorlesungsmanuskript von Prof. Dr. G. Waller, Fachhochschule Kiel, Fachbereich Informatik und Elektrotechnik, Version 1.3, ab SS 2005
- [WAT 04] P. Koniorczyk, J. Zmywaczyk, M. Kowalski: Analytische und zahlenmäßige Analyse des Problems der 'Dicke-Effekt-Kurve' in interaktiven optischen Medien und einige Probleme bei Eigenschaften von Innenwandanstrichen mit niedrigem Emissionsvermögen ("Thermo-Shield"), WAT Warschau, 10.2004
- ebenda: [6] G. Hugo, Effects of low emissivity wall coatings on thermal comfort and energy consumption, High Temperature – High Pressures, 2001, Bd. 33. S. 1-8.).
- [WFA 01] D. Mainka, L. Siebel: Bauphysikalische Stellungnahme WF-E310301 zum thermischen Verhalten von Außenwänden, WFA Institut, Stolberg, 02.04.2001

Inhaltsverzeichnis

Grundsätzliches aus der Strahlungsphysik

Strahlung und Wellenlängen

Abstrahlung, Emission

Bestimmung des Reflexionsgrades

Theoretisches aus der Welt der Wissenschaft

Messpraktisches, Teil 1: Laborwerte

Baupraktisches

Messpraktisches Teil 2: in situ & analytisch

Praktische Bedeutung

© SICC GmbH, dib, 11.07.2005