

**Qualifizierung des instationären Heizstreifenverfahrens (THS) für Messungen thermischer Eigenschaften beschichteter Oberflächen**

**T 2894**

**T 2894**

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2000, ISBN 3-8167-5704-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail [irb@irb.fhg.de](mailto:irb@irb.fhg.de)

URL <http://www.irb.fhg.de>

# Qualifizierung des instationären Heizstreifenverfahrens (THS) für Messungen thermischer Eigenschaften beschichteter Oberflächen

Ulf Hammerschmidt  
Wladimir Sabuga

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Theorie des THS-Verfahrens</b> .....	<b>3</b>
2.1	Unbegrenzte homogene Proben.....	3
2.2	Begrenzte homogene Proben.....	4
2.3	Inhomogene Proben .....	6
<b>3</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b> .....	<b>7</b>
3.1	Messgeräte und -verfahren.....	7
3.1.1	THS-Gerät .....	7
3.1.2	Plattengerät .....	8
3.1.3	Gerät zur Bestimmung des gerichteten Gesamtemissionsgrads .....	8
3.1.4	Gerät zur Bestimmung des spektralen Gesamtemissionsgrads.....	9
3.2	Probenwahl.....	9
3.3	Messergebnisse .....	10
3.3.1	Wärmeleitfähigkeit.....	10
3.3.2	Optische Eigenschaften.....	12
3.3.2.1	Spektraler Emissionsgrad .....	12
3.3.2.2	Spektraler Reflexionsgrad.....	12
3.3.2.3	Spektraler Transmissionsgrad .....	16
3.3.2.4	Gesamtemissionsgrad .....	16
3.4	Bewertung .....	19
3.5	THS-Messungen .....	20
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>24</b>

# 1 Einleitung

Seit einiger Zeit drängen verstärkt sogenannte Thermobeschichtungen auf den Markt für den baulichen Wärmeschutz. Es handelt sich um spezielle Farbanstriche, die neben Pigmenten auch bestimmte Mikrokörper (z.B. Metallspäne, Keramikkügelchen) enthalten. Aufgetragen auf das zu dämmende Bauteil sollen sie den Wärmeverlust spürbar verringern. Hierzu müßte grundsätzlich der Wärmedurchlaßwiderstand  $R$  der Beschichtung sehr gering sein im Vergleich zum Bauteil und/oder ihr Emissionsgrad  $\varepsilon$  relativ niedrig.

Für die bauaufsichtliche Zulassung von Thermobeschichtungen als Wärmedämmsystem müssen die beiden genannten Transportparameter zuverlässig bekannt sein. Diese lassen sich zwar mit bekannten Verfahren einzeln bestimmen, der technische, zeitliche und finanzielle Aufwand ist indes überaus hoch. Eine Methode, die schnell, zuverlässig und preisgünstig die thermische Prüfung der genannten Beschichtungen erlaubt, ist daher wünschenswert.

Das transiente Heizstreifenverfahren (THS), das bereits als Richtlinie des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Ziegelscherben vorliegt, kann die genannten Forderungen möglicherweise erfüllen. Vorversuche mit einem THS-Gerät haben gezeigt, dass dessen Ausgangssignal ein Maß sein kann für unterschiedliche Wärmetransporteigenschaften innerhalb eines Schichtstoffes ( $k$ ) und an dessen Oberfläche ( $\varepsilon$ ).

Zur Qualifizierung des Verfahrens für die skizzierte Messaufgabe sind theoretische als auch experimentelle Untersuchungen durchgeführt worden. Die Experimente gliedern sich in Messungen mit dem THS-Gerät an beschichteten und unbeschichteten Proben einerseits und entsprechende Vergleichsmessungen nach bekannten Einzelverfahren andererseits. Letztere lieferten die thermischen und optischen Vergleichswerte. Im Rahmen der Untersuchungen sollen die thermischen Eigenschaften der genannten Beschichtungen charakterisiert und die Grundlagen für ein zuverlässiges Auswerteverfahren für deren Prüfung mit dem THS-Gerät erarbeitet werden.

## 2 Theorie des THS-Verfahrens

### 2.1 Unbegrenzte homogene Proben

Ein zweidimensionaler Metallstreifen ( $x = 0, -d \leq y \leq d, z \rightarrow \infty$ ) der Breite  $D = 2d$  ist vollständig umgeben von einem unbegrenzten, homogenen und isotropen Medium der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und der Temperaturleitfähigkeit  $a$ . Die Temperatur von Streifen und Medium ist  $T_0 = T(t_0)$ . Beginnend zur Zeit  $t = t_0$  wird dem Streifen kontinuierlich die längenspezifische elektrische Leistung  $P/L = U_0 I/L = \text{const.}$  zugeführt, die er als Wärmestrom  $\Phi_0 = P$  in die Probe freisetzt. Hierbei steigt mit seiner Temperatur  $T(t)$

$$\Delta T(t) = T(t) - T_0 = \frac{U_0 I}{2\sqrt{\pi} L \lambda} \cdot f(\tau) \quad (1)$$

auch der elektrische Spannungsabfall  $U(T(t)) = U_0(1 + \alpha \Delta T)$  zwischen seinen beiden Enden an. Dieses transiente Ausgangssignal der Messung folgt der Arbeitsgleichung [1]:

$$\Delta U(T(t)) = U(T(t)) - U_0 = \frac{\alpha U_0^2 I}{2\sqrt{\pi} L \lambda} \cdot f(\tau) = U_0 + k f(\tau) \quad (2)$$

mit  $f(\tau) = f_1(\tau) + f_2(\tau) + f_3(\tau) = \tau \operatorname{erf}(\tau^{-1}) - \frac{\tau^2}{\sqrt{4\pi}} \left[ 1 - \exp(-\tau^{-2}) \right] - \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \operatorname{Ei}(-\tau^{-2}) \quad (3)$

und  $\tau = \frac{\sqrt{4at}}{D} \quad (4)$

Hierin bezeichnet  $\alpha$  den Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstands des Streifens und  $\tau$  die dimensionslose Zeit.

Für die Messpraxis hat die für den oben skizzierten idealen Fall geltende Gleichung (2) drei wesentliche Nachteile: Erstens ist sie nichtlinear und implizit in den Meßgrößen  $\lambda$  und  $a$ , was

zu ihrer Auswertung eine komplizierte numerische Schätzung erforderlich macht. Zweitens gilt sie, wie oben erwähnt, zeitlich unbeschränkt nur für unbegrenzte Proben. Das Verhalten realer Proben wird nur in einem Zeitintervall  $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$  beschrieben, in dem sich die thermische Wirkung des Streifens auf die Probe begrenzen läßt. Die genannten Intervallgrenzen gehen, drittens, nicht aus der Theorie hervor und können daher nur geschätzt werden. Dies führt im allgemeinen zu einer relativ hohen Messunsicherheit.

### 2.2.1 Begrenzte homogene Proben

Die genannten praktischen Nachteile der THS-Arbeitsgleichung sind wie folgt zu überwinden [2]: Für Zeiten  $\tau \geq 2$  läßt sich die Funktion  $f(\tau)$  mit sehr guter Genauigkeit abschätzen zu

$$f(\tau) \approx \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \left( \ln \frac{45a\tau}{D^2} \right), \quad (5)$$

so dass man als Arbeitsgleichung für das THS-Signal den Ausdruck

$$U(t) - U_0 \approx \frac{\alpha U_0^2 I}{4\pi L \lambda} \left( \ln t + \ln \frac{45a}{D^2} \right) = m \ln t + n \quad (6)$$

erhält [2]. Im Gegensatz zu (2) ist diese Zahlenwertgleichung (quasi-)linear in  $\ln t$  und explizit in beiden Meßgrößen:

$$\lambda = \frac{\alpha U_0^2 I}{4\pi L m} \quad (7)$$

$$a = \frac{D^2}{45} \exp\left(\frac{n}{m}\right) \quad (8)$$

In der Messpraxis gilt die Gleichung (6) allerdings nur stückweise im Zeitintervall  $[2, \tau_{\max}]$ . Hier erhält man einen linearisierbaren Abschnitt mit der Steigung  $m$  und dem Achsenabschnitt  $n$ , wenn das Messsignal über dem natürlichen Logarithmus der Zeit ( $\ln t$ ) aufgetragen wird. (siehe Abb. 1, lin. Approx. „L1“). Die obere Intervall-Grenze folgt aus

$$\tau_{\max} \approx u \frac{R_0^2}{D^2} \quad (9)$$

als Funktion der Probendicke  $R_0$  und der Streifenbreite  $D$ .  $u$  bezeichnet eine dimensionslose Gerätevariable, die von den thermischen Randbedingungen (z.B. Probenhalterung) abhängt. Die Zeit  $\tau_{\max}$  ist erreicht, sobald die vom Streifen verursachte thermische Störung am Rand der homogenen Probe ankommt. Im Experiment ist dieser Zeitpunkt daran zu erkennen, dass das THS-Signal vom quasilinearen Verlauf abweicht (vergl. Abb. 1).

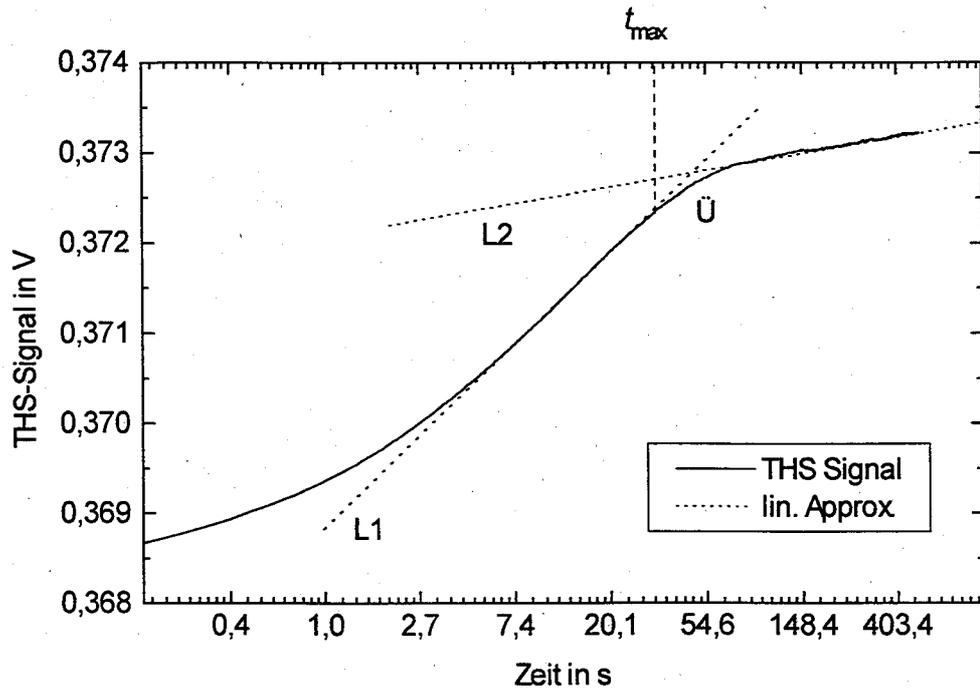


Abb. 1: THS-Signal an Pyrex, ummantelt mit Kupfer, als Funktion der Zeit in logarithmischer Darstellung ( $\ln t$ ).

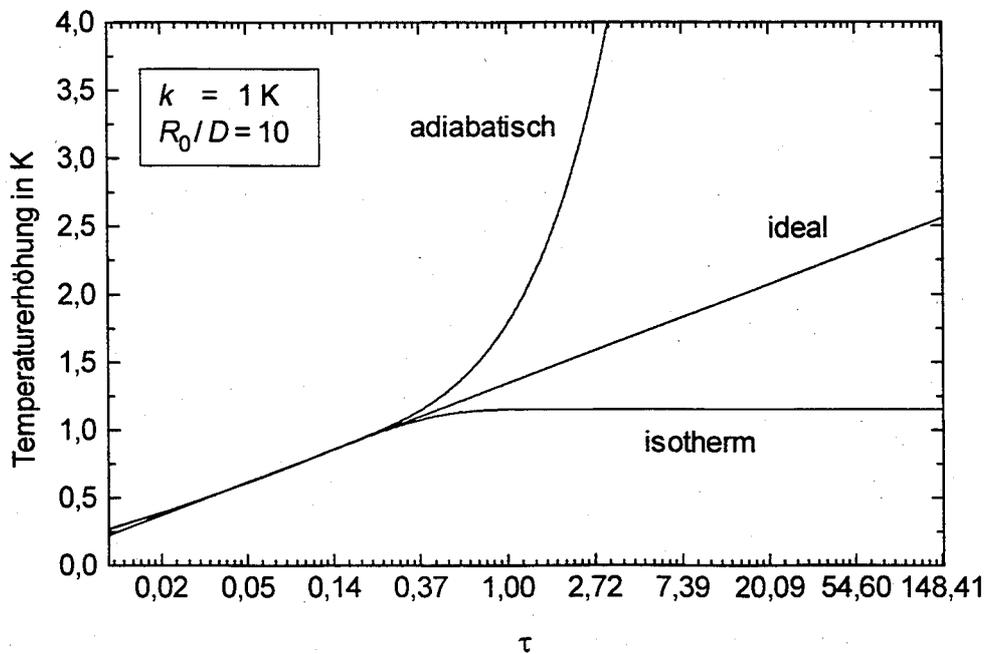


Abb. 2: Berechnete Temperaturerhöhung im Streifen gegen die dimensionslose Zeit für drei unterschiedliche Randbedingungen der Probe (ideal, adiabatisch, isotherm).  $k$  bezeichnet hier die Amplitude des Signals,  $R_0/D$  ist das Verhältnis von Probendicke zu Streifenbreite.

### 2.2.2 Inhomogene Proben

Nachdem der Wärmestrom des Streifens zum Zeitpunkt  $\tau_{\max}$  die äußere Oberfläche der Probe erreicht hat, breitet er sich in das umgebende Medium aus. Abhängig von den thermischen Eigenschaften dieses Mediums erfolgt der Wärmetransport durch Leitung, Konvektion und / oder Strahlung. Da alle drei Transportmechanismen auf jeweils individuelle Weise von der Beschaffenheit der Probenoberfläche (z.B. Akkomodationskoeffizient  $\alpha$  bzw. Emissionsgrad  $\varepsilon$ ) abhängen, muß diese als zur Umgebung gehörig erkannt werden. Hat also die Wärmefront die äußere Oberfläche der Probe erreicht, so werden in der Folge nicht mehr ausschließlich nur deren thermische Eigenschaften gemessen, sondern vielmehr auch diejenigen der Oberfläche und der weiteren Umgebung. In Abbildung 1 ist das THS-Signal in der üblichen linearisierten Darstellung wiedergegeben, wie es für eine Pyrex-Glasprobe gemessen wurde, die vollständig mit einem 2-cm dicken Kupfermantel umgeben war. Man erkennt die beiden linearisierbaren Abschnitte, deren erster (L1) die Wärmeleitfähigkeit des Pyrex widerspiegelt. Der zweite (L2) ist ein Maß für die Wärmeleitfähigkeit des Kupfers, bezogen auf diejenige der Trägersubstanz. Die theoretische Beschreibung des Intervalls L2 ist noch offen. Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten theoretischen wie auch numerischen Untersuchungen werden fortgesetzt. Bekannt ist bisher, daß alle Kurven oberhalb von  $\tau_{\max}$  in einem Bereich liegen müssen, der von den beiden Kurven „adiabatisch“ und „isotherm“ aus Bild 2 aufgespannt wird. Die beiden genannten Grenzkurven sind nach analytischen Modellen für adiabatische bzw. isotherme Randbedingungen der Probe nach [14] berechnet worden.

Es besteht allerdings bereits jetzt die Möglichkeit des qualitativen Vergleichs thermisch verschiedenartiger Umgebungen einer Probe (siehe hierzu Abschnitt 3.5).

### 3 Experimentelle Untersuchungen

Die wärmeschutztechnische Wirkung einer opaken Beschichtung läßt sich mit deren Emissionsgrad  $\varepsilon$  und Wärmedurchlaßwiderstand  $R$  beschreiben (DIN ISO 12241). Hinsichtlich des Wärmetransports durch Strahlung sind der Gesamtemissionsgrad sowie der spektrale Emissionsgrad und Reflexionsgrad zu bestimmen. Die unterstellte Strahlungsundurchlässigkeit (Opazität) wird mit einem Transmissionsspektrum nachgewiesen. Hinsichtlich des konduktiven Wärmetransports durch eine Schicht der Dicke  $d$  ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  die kennzeichnende physikalische Größe, da  $R = d/\lambda$ .

Ein Einfluß der äußeren Oberfläche der Beschichtung auf die dort herrschende Konvektion wird als wärmeschutztechnisch unwirksam betrachtet. Gleichwohl wird der spektrale Emissionsgrad von zwei nach unterschiedlichen Verfahren (gerollt, gespachtelt) aufgetragenen Beschichtungen untersucht.

#### 3.1 Messgeräte und -verfahren

Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurde das selbstgebaute Plattengerät der PTB eingesetzt. Ebenfalls mit Eigenkonstruktionen wurden der gerichtete Gesamtemissionsgrad und der spektrale Emissionsgrad gemessen ([5], [6]). Der spektrale Reflexionsgrad und der spektrale Transmissionsgrad wurden mit kommerziellen Geräten gemessen. Das THS-Gerät diente zur qualitativen Überprüfung der Beschichtungseigenschaften von „TE“, weiß.

##### 3.1.1 THS-Gerät

Entsprechend den theoretischen Vorgaben im Abschnitt 2 ist beim thermischen Teil des THS-Gerätes ein dünner Metallstreifen der Breite 3 mm und der Länge 110 mm zwischen die beiden quaderförmigen Probenhälften ( $30 \times 30 \times 100 \text{ mm}^3$ ) geklemmt. Diese Anordnung befindet sich in temperierter Umgebung (Ofen, Thermostat, ...) auf konstanter homogener Meßtemperatur. Die beiden Enden (jeweils 5 mm) des Drahtes sind für eine elektrische Widerstandsmessung nach der Vierpolmethode mit einer Konstantstromquelle (0 ... 5 A) und einem Digitalvoltmeter verdrahtet (elektrischer Teil). Zur Messung wird dem Streifen für die Dauer von einigen Minuten ein elektrischer Heizstrom aufgeprägt und gleichzeitig sein temperaturabhängiger Span-

nungsabfall als Funktion der Zeit registriert. Dieses Ausgangssignal ist das Maß für die Wärmeleitfähigkeit der Probe gemäß Gl. (7). Die Messunsicherheit  $2s(\lambda) = 4,8\%$  [3].

### 3.1.2 Plattengerät

Das stationär arbeitende Einplattengerät hat einen Messbereich von 0,1 bis  $6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  bei einer beliebigen Arbeitstemperatur  $T_W$  aus dem Bereich von  $-75$  bis  $190 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die ISO-Standard-Messunsicherheit beträgt  $2s(\lambda) = 4,8\%$  [4]. Aufbau und Funktion des Geräts sind folgendermaßen:

Die zylindrische Probe mit der Querschnittsfläche  $A = 7853,98 \text{ mm}^2$  und der Dicke  $d$  ( $5 \text{ mm} \leq d \leq 25 \text{ mm}$ ) befindet sich zwischen der oberen elektrischen Heizplatte und der unteren thermostatisierten Kühlplatte. Die Heizplatte setzt die konstante Aufnahmeleistung  $P = UI$  in den Wärmestrom  $\Phi = P$  um, der auf seinem Weg zur Kühlplatte die Probe durchfließt. Hierbei entsteht ein Temperaturabfall  $\Delta T$  über der Probe, der ein Maß für deren Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist. Schutzheizungen umgeben die Heizplatte derart, daß der Wärmestrom möglichst vollständig an die Probe abfließt. Die Wärmeleitfähigkeit errechnet sich aus

$$\lambda(T_W) = \frac{P \cdot d}{A \cdot \Delta T} \quad (10)$$

### 3.1.3 Gerät zur Bestimmung des gerichteten und des hemisphärischen Gesamtemissionsgrads

Das Gerät misst den gerichteten Gesamtemissionsgrad  $\varepsilon_g$  im Winkelbereich  $\vartheta = 0^\circ$  bis  $75^\circ$  bei Temperaturen zwischen  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  [5]. Zur Berechnung des hemisphärischen Gesamtemissionsgrades  $\varepsilon_\Omega$  paßt man die bei verschiedenen Winkeln  $\vartheta$  gemessenen Werte an die Fresnelsche Gleichung an, wobei die Brechzahl und die Absorptionskonstante als unbekannt Parameter betrachtet werden. Die Fresnelsche Gleichung, mit  $2 \sin(\vartheta) \cos(\vartheta)$  multipliziert und über  $\vartheta$  von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  integriert, liefert schließlich den gesuchten Wert.

Das Prinzip zur Messung des gerichteten Gesamtemissionsgrades besteht darin, die Ausstrahlung einer Probe mit derjenigen eines schwarzen Körpers der gleichen Temperatur zu vergleichen. Hierzu wird die Probe auf einen aus Kupfer gefertigten drehbaren Probenhalter aufgebracht und in eine schwarze Umhüllung mit Beobachtungsfenster gegeben. Die Umhüllung befindet sich zusammen mit dem schwarzen Körper und dem Strahlungsempfänger, einer Thermosäule, in einer evakuierbaren Kammer. Der Strahlungsempfänger und die Umhüllung beziehungsweise der schwarze Körper und der Probenhalter werden mit thermostatisierten Flüssigkeiten auf die gleiche Temperatur gebracht. Der Strahlungsempfänger wird nacheinander zuerst auf die Probe und dann auf den schwarzen Körper gerichtet. Das Verhältnis beider Signale, mit  $(T_{BB}^4 - T_D^4) / (T_{SS}^4 - T_D^4)$  multipliziert, ergibt den Messwert  $\varepsilon_g$  für den eingestellten Winkel  $\vartheta$ .  $T_{BB}$ ,  $T_{SS}$  und  $T_D$  sind die absoluten Temperaturen des schwarzen Körpers, der Probenoberfläche und des Strahlungsempfängers.

### 3.1.4 Gerät zur Bestimmung des spektralen Gesamtemissionsgrads

Das Gerät misst den spektralen gerichteten Emissionsgrad  $\varepsilon_{\lambda, \theta}$  im Wellenlängenbereich von 2,5  $\mu\text{m}$  bis 51  $\mu\text{m}$  mit einer spektralen Auflösung von  $8 \text{ cm}^{-1}$  bei Temperaturen zwischen 50 °C und 600 °C [6].

Das Messprinzip besteht wiederum in einem Vergleich der Ausstrahlung der drehbar gehaltenen Probe mit derjenigen eines schwarzen Körpers. Als Strahlungsempfänger dient ein umgebautes FTIR Nicolet 5DXB Spektrometer mit einem DTGS-Detektor. Die Messung wird in Luft durchgeführt, die vorher getrocknet wurde, um den Einfluß der H<sub>2</sub>O- und CO<sub>2</sub>-Absorptionsbanden zu minimieren. Konvektive Wärmeverluste werden rechnerisch erfaßt und als Korrektur berücksichtigt.

### 3.2 Probenwahl

Zur Auswahl des Probematerials wurde folgendes Kriterium gestellt, das auch für wirksame Thermobeschichtungen gelten sollte: Die Wärmeleitfähigkeit soll möglichst kleiner als  $\lambda = 0,06 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  sein (Wärmedämmstoffe) und/oder ihr Emissionsgrad  $\varepsilon$  soll im interessierenden Wellenlängenbereich kleiner als 0,6 sein.

Für die Experimente wurde die Thermobeschichtung „TE“, Grundfarbe: weiß der Firma „T“ ausgewählt. Vor den Messungen waren folgende Eigenschaften aus mitgelieferten Datenblättern bekannt:

„Tx“ ist laut Angaben des Herstellers ein thermokeramisches Beschichtungssystem zum Gebäude- und Wärmeschutz [8]. In einer Acrylharz-Dispersion befinden sich Pigmente, ferner sogenannte „vakuumisierte ‘ceramic bubbles’ sowie metallische Mikropartikel“ (Titan und Aluminium). Die mit einem Volumenanteil von 40% bis 60% vorhandenen ‘ceramic bubbles’ stehen nach den Aussagen des Herstellers für eine hohe Wärmedrosselung durch das innere Vakuum, die Metallpartikel für die hohe Reflexionswirkung. „T“ bietet drei verschiedene Beschichtungen an, „TE“ für Fassaden, „TI“ für Innenwände und „TTS“ für Flachdächer. Laut Datenblatt unterscheiden sich die drei genannten Sorten hinsichtlich ihrer Anteile an Wasser (32%, 18,5%, 23%), Pigmenten (27%, 19%, 14%) und den wasserlöslichen Acryliden (32%, 53%, 53%), nicht jedoch hinsichtlich der Anteile an den ‘ceramic bubbles’. Zum jeweiligen Gehalt an Metallpartikeln werden keine Angaben gemacht. Der  $k$ -Wert einer Schicht „TE“ oder „TI“ der Dicke von 0,25 mm wird mit  $k = 0,608$  angegeben, die Wärmeleitfähigkeit mit  $\lambda = 0,000152 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Für „TTS“ soll gelten  $\lambda = 0,000145 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ , was einen Wärmedurchgangskoeffizienten  $k = 0,580$  ergibt. Der in den Datenblättern als Funktion der Wellenlänge abgebildete gerichtet-hemisphärische Reflexionsgrad ist in [8] dargestellt. Daten zum Emissionsgrad waren nicht zu erhalten.

Das angegebene Wirkprinzip und der Grad der Wärmedämmung ist bei den drei genannten Sorten laut Herstellerangaben identisch. Für die Messungen haben wir uns daher auf „TE“, weiß beschränken können.

Als Vergleich für die optischen Eigenschaften von „TE“, weiß wurden zwei Farben („Sx“) der Firma „WL“ ausgewählt, „S-LEP“ Bronzegrün („SB“) und Sandfarbe („SS“):

„Sx“ ist ein sogenanntes „low emissivity paint“, eine Zweikomponenten-Farbe auf Basis von hydroxylgruppenhaltigen Polyacrylaten und aliphatischem Isocyanat als Härter. Der Festkörperanteil beträgt etwa 45% nach DIN 53219 bei abgehärtetem Lack. „Sx“ kann als Tarnfarbe in der Wehrtechnik immer dann eingesetzt werden, wenn ein geringer spektraler Emissionsgrad im IR-Bereich gefordert ist. Als optische Eigenschaft wird vom Hersteller nur der Glanz ( $\leq 8\%$  /  $85^\circ$  Winkel) angegeben [7].

Alle drei Beschichtungen wurden direkt beim Hersteller bestellt und auch von dort angeliefert.

### 3.3 Messergebnisse

Mit den oben erwähnten Verfahren wurden von der LEP-Beschichtung „Sx“ die beiden genannten Farbtöne untersucht und von „T“ die Sorte „TE“, weiß.

Die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur wurde an dem genannten Produkt von „T“ gemessen, um den angegebenen Wert zu überprüfen; nicht jedoch an den LEP's, da hier der vom Hersteller übermittelte Wert von  $\lambda \approx 0,3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  plausibel erscheint.

Im Rahmen der optischen Messungen wurden an allen drei Farben der spektrale gerichtete Emissionsgrad, der gerichtete Gesamtemissionsgrad und der hemisphärische Gesamtemissionsgrad bestimmt. An „TE“ wurden zusätzlich der spektrale Transmissionsgrad und der spektrale normal-hemisphärische Reflexionsgrad gemessen.

#### 3.3.1 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von „TE“ wurde für Temperaturen zwischen  $-20$  und  $+30$  °C bei einer Schichtdicke von  $d = 5,393$  mm im Plattengerät gemessen. Bei den Messungen befand sich die Farbprobe zwischen zwei Duralplatten mit den Dicken  $d_1 = 8,78$  mm beziehungsweise  $d_2 = 8,62$  mm. Die Metallplatten waren mit Silikonöl an die Messgeräteplatten thermisch angekoppelt. Ihr Einfluß auf den unberichtigten Messwert wurde korrigiert. Die genannte Dicke der Probe wurde erreicht, indem die Farbe schichtweise nach dem Abtrocknen immer wieder mit einem Pinsel überstrichen wurde. Die Messwerte sind in Tabelle 1 aufgelistet und im Bild 3 dargestellt. Die prozentuale Abweichung über dem gemessenen Temperaturbereich beträgt maximal 1%. Zwischen  $10$  und  $20$  °C sinkt die Wärmeleitfähigkeit nur um 0,6%. Ein „Dickeneffekt“, d.h. eine abnorme Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Dicke der Probe, läßt sich bei „TE“ erfahrungsgemäß ausschließen (s.a. Abschnitt 3.5).

Die Firma „T“ gibt die Wärmeleitfähigkeit von „TE“ ohne die zugehörige Temperatur mit  $\lambda = 0,000152 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  an. Für einen Farbauftrag der Dicke  $d = 0,25$  mm ergibt sich daraus rechnerisch der ebenfalls angeführte Wärmedurchgangskoeffizient von  $k = 0,608$  für opakes Material. Die genannte äußerst geringe Wärmeleitfähigkeit folgt laut Firmenprospekt aus einem Gutachten von „Calcoast Analytical-ITL Institut“ von 1991 [8]. Hier wird die Wärmeleitfähigkeit mit  $0,0454 \text{ cal cm} / (\text{scm}^2 \text{ }^\circ\text{C})$  für eine Schichtdicke von  $d = 0,25$  mm angegeben. Dies entspricht allerdings  $0,316 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  und nicht dem oben genannten Wert. Der Wärmedurchgangskoeffizient für die genannte Schichtdicke wäre dann  $k = 1260$ .

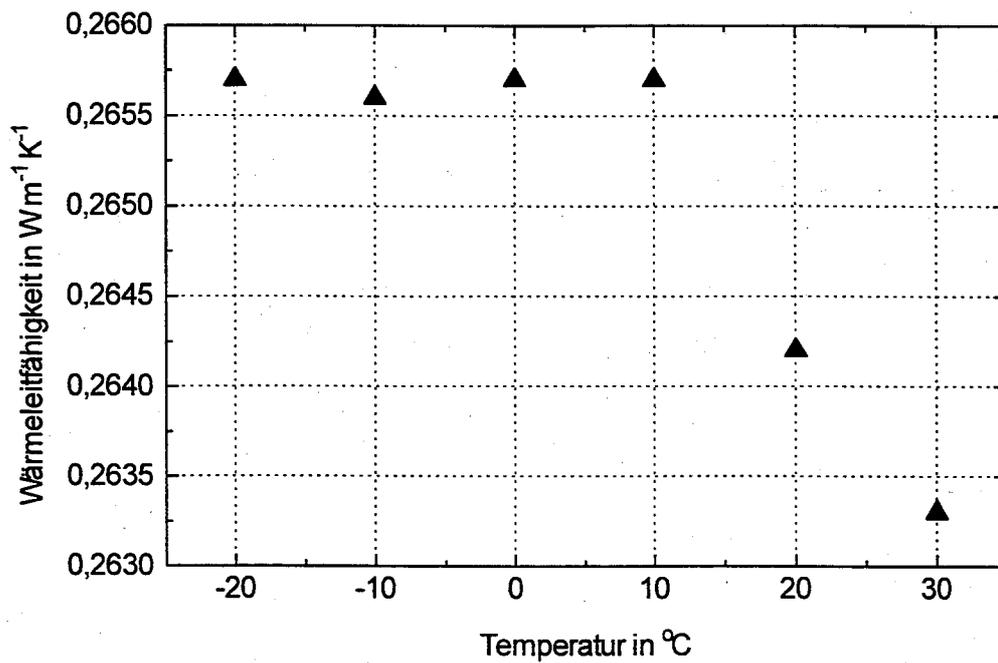


Abb. 3: Die Wärmeleitfähigkeit von „TE“, weiß.

Tab. 1: Wärmeleitfähigkeit von „TE“ gemessen bei einer Schichtdicke von 5 mm mit dem Plattengerät

Temperatur in °C	Wärmeleitfähigkeit in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
-20	0,2657
-10	0,2656
0	0,2657
10	0,2657
20	0,2642
30	0,2633

### 3.3.2 Optische Eigenschaften

Als Träger für die drei untersuchten Farben dienten Kupferscheiben mit einem Durchmesser von 90 mm und einer Dicke von 4 mm. Die Farben „SS“ und „SB“ wurden im Spritzverfahren aufgebracht mit mittleren Dicken von 0,079 mm beziehungsweise 0,073 mm.

Mit „TE“, weiß wurden zwei Proben hergestellt. Bei einer wurde die Farbe durch Rollen bei der anderen durch Spachteln aufgetragen. Die mittleren Schichtdicken betragen 0,105 mm beziehungsweise 0,124 mm. Die Oberfläche der aufgespachtelten Farbe wirkt glatter als diejenige der gerollten. Dieser Eindruck wird bestätigt durch Rauheitsmessungen, die für den gespachtelten Anstrich den arithmetischen Mittenrauhwert von 0,79  $\mu\text{m}$  ergaben und für den gerollten 2,21  $\mu\text{m}$ .

#### 3.3.2.1 Spektraler Emissionsgrad

Der spektrale gerichtete Emissionsgrad aller Proben wurde bei einer Temperatur von 60 °C gemessen. Die Richtungswinkel (gerechnet von der Normalen zur Probenoberfläche) lagen bei 5°, 15°, 30°, 40°, 45°, 50°, 60° und abschließend wieder bei 5° (Kontrollmessung).

Im Bild 4 sind die Ergebnisse für „SS“ dargestellt. Im mittleren Wellenlängenbereich zwischen 7  $\mu\text{m}$  und 20  $\mu\text{m}$  nimmt der spektrale Emissionsgrad mit dem Winkel zu. Dieses Verhalten ist typisch für elektrische Leiter. (Die Werte unterhalb 4  $\mu\text{m}$  und oberhalb 45  $\mu\text{m}$  sind ausgeblendet worden, weil sie wegen ihres ungünstigen Signal-Rauschen-Verhältnisses mit relativ hohen Unsicherheiten behaftet sind.)

Der im Bild 5 gezeigte spektrale gerichtete Emissionsgrad der Farbe „SB“ ist im Winkelbereich 5° bis 50° praktisch richtungsunabhängig. Erst bei 60° nimmt der Emissionsgrad ab. Dieses Verhalten ist charakteristisch für Nichtleiter.

Der spektrale gerichtete Emissionsgrad der Farbe „TE“, gerollt und gespachtelt ist in den Abb. 6 bzw. Abb. 7 dargestellt. Er nimmt, ähnlich „SB“, bei höheren Winkeln leicht ab. Des Weiteren ist eine starke Verringerung des Emissionsgrades in Richtung kleinerer Wellenlängen, d.h. in Richtung zum sichtbaren Wellenlängenbereich (0,4  $\mu\text{m}$  bis 0,8  $\mu\text{m}$ ), erkennbar.

Der spektrale normale Emissionsgrad aller drei Farben ist im Bild 8 zusammengefaßt. „TE“, weiß zeigt hier den höchsten Emissionsgrad. Trotz der unterschiedlichen Oberflächen-Rauheiten dieser Farbe im gespachtelten und gerollten Zustand sind die spektralen Emissionsgrade fast gleich.

Die kombinierten erweiterten Unsicherheiten (Erweiterungsfaktor 2) der in den Bildern 4 bis 8 dargestellten Emissionsgrade sind in der Tabelle 2 angegeben.

#### 3.3.2.2 Spektraler Reflexionsgrad

Die Messung des spektralen normal-hemisphärischen Reflexionsgrades an „TE“, weiß soll ergänzende Information zu den spektralen normalen Emissionsgradwerten liefern. Die Messungen wurden an zwei unterschiedlich präparierten Proben durchgeführt:

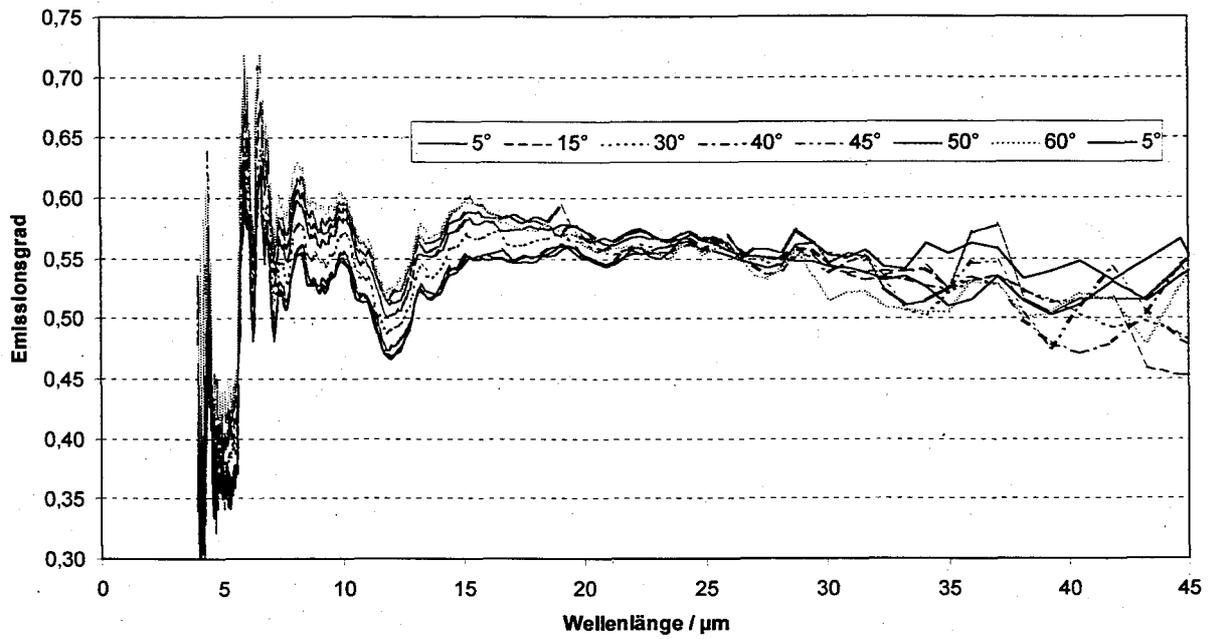


Abb. 4: Gerichteter Emissionsgrad von „SS“ bei 60 °C als Funktion der Wellenlänge.

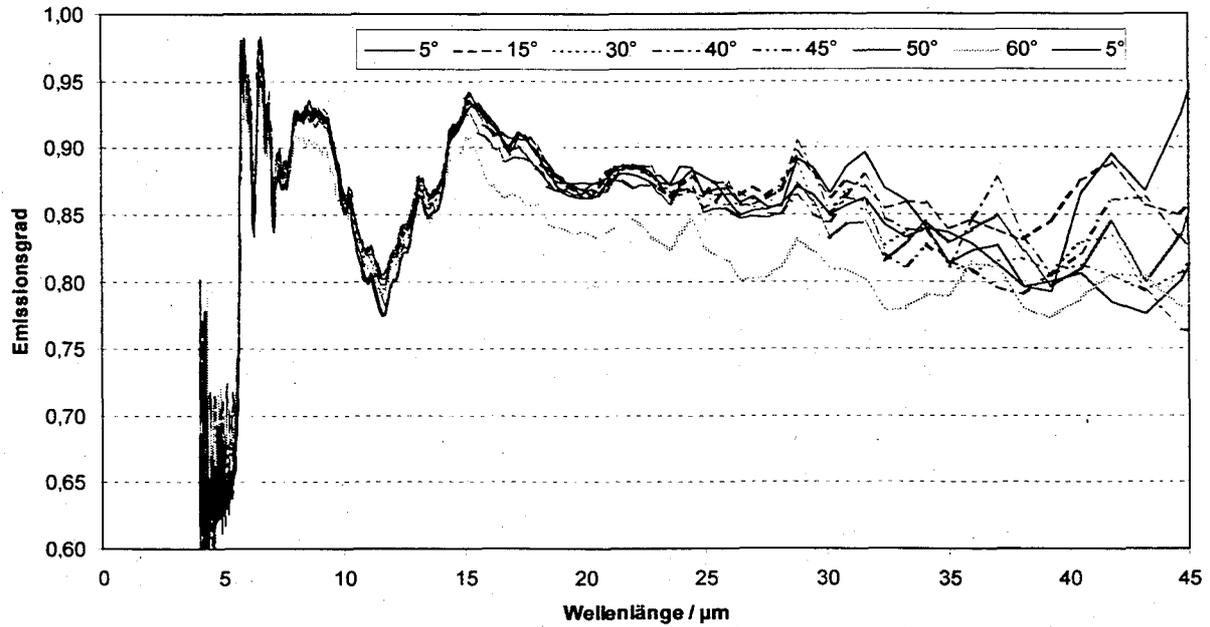
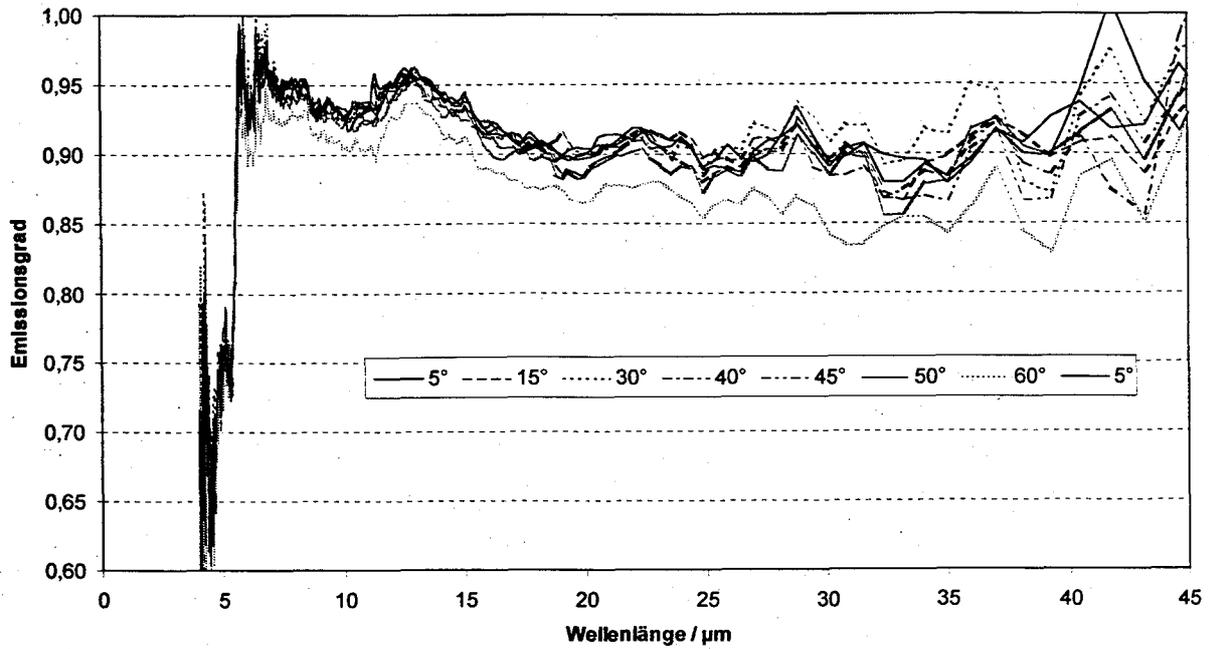
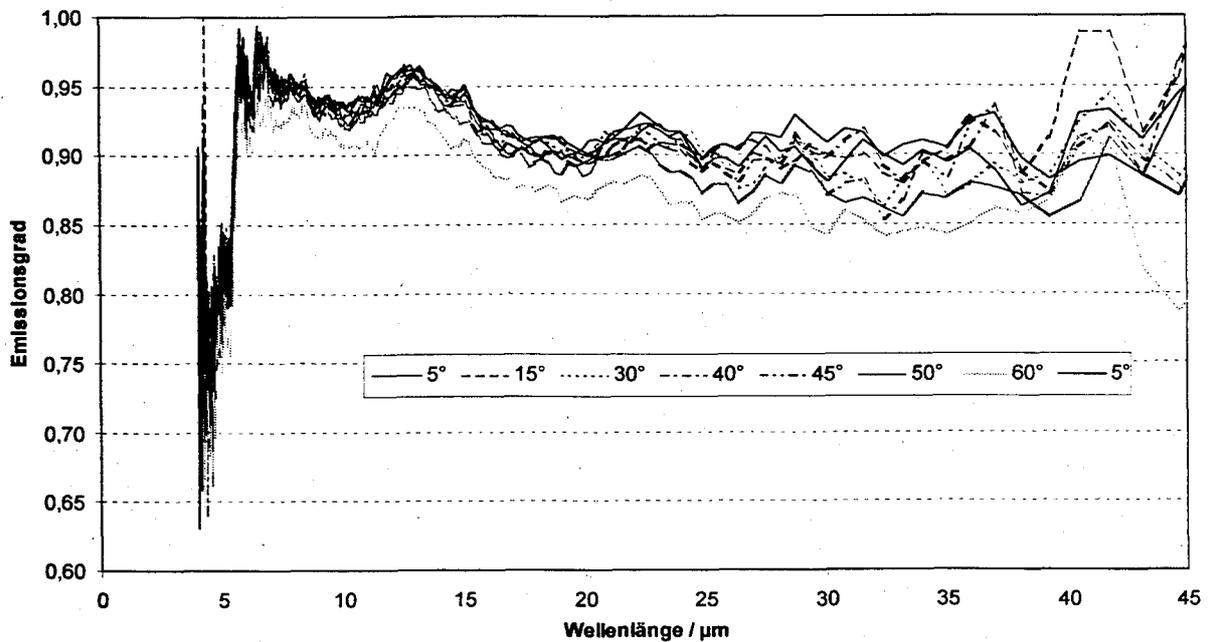


Abb. 5: Gerichteter Emissionsgrad von „SB“ bei 60 °C als Funktion der Wellenlänge.



**Abb. 6:** Gerichteter Emissionsgrad von „TE“, weiß, gerollt bei 60 °C als Funktion der Wellenlänge.



**Abb. 7:** Gerichteter Emissionsgrad von „TE“, weiß, gespachtelt bei 60 °C als Funktion der Wellenlänge.

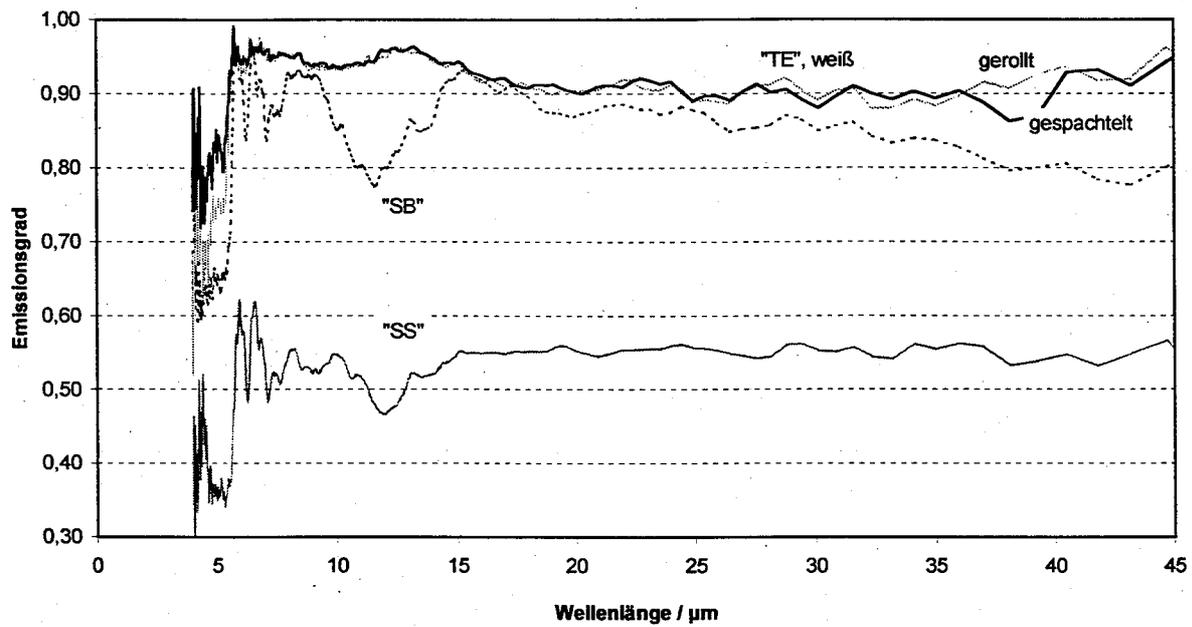


Abb. 8: Spektraler normaler Emissionsgrad der drei untersuchten Farben

Tab. 2. Kombinierte erweiterte (Faktor 2) Messunsicherheiten im spektralen Emissionsgrad

Wellenlänge in μm	Unsicherheit $2s(\varepsilon_{\lambda, \theta})$
4 bis 4,5	0,32
4,5 bis 5,3	0,10
5,3 bis 6,6	0,06
6,6 bis 7,3	0,03
7,3 bis 11	0,02
11 bis 28	0,03
28 bis 34	0,06
34 bis 40	0,08
40 bis 43	0,10
43 bis 45	0,16

Bei der ersten handelt es sich um die bereits erwähnte, auf eine Kupferscheibe aufgespachtelte Farbe. Für die zweite wurde Farbe auf ein Steinsalzfenster aufgerollt. Diese Probe wurde später auch für Messungen des Transmissionsgrades verwendet (s. a. Abschnitt 3.3.2.3). Der spektrale normal-hemisphärische Reflexionsgrad dieser zwei Proben wurde nacheinander mit zwei verschiedenen Geräten mit unterschiedlichen spektralen Bereichen gemessenen. Die Ergebnisse sind im Bild 9 dargestellt. Es enthält zusätzlich eine entsprechende Meßkurve der Firma „T“ aus einem ihrer Datenblätter. Die drei Datensätze sind vereinbar.

Leonidowitsch und Wladimirowitsch [9] finden bei ihrer Untersuchung des spektralen Reflexionsgrades von „Tx“ im sichtbaren Bereich zwischen 0,5 und 1  $\mu\text{m}$  Werte von „mindestens 90%“.

Die Unterschiede zwischen den beiden PTB-Ergebnissen im Wellenlängenbereich unter 2  $\mu\text{m}$  sind deutlich größer als die kombinierten erweiterten Unsicherheiten (mit Erweiterungsfaktor 2) der verwendeten Meßgeräte, die auf jeweils 3% geschätzt werden. Sie sind offensichtlich auf die unterschiedliche Beschaffenheit (gerollt, gespachtelt) der zwei Farboberflächen zurückzuführen.

Alle für den Farbenanstrich „TE“ vorliegenden Emissions- und Reflexionsgraddaten sind im Bild 10 zusammengefasst. Die Reflexions- und Emissionsgradwerte der PTB stimmen innerhalb der kombinierten erweiterten Unsicherheiten (mit Erweiterungsfaktor 2) überein. Die starke Abnahme des Emissionsgrades unterhalb 2  $\mu\text{m}$  veranschaulicht den Übergang von einem "weißen" Aussehen der Farbe im sichtbaren zu einer nahezu "schwarzen" Oberfläche im infraroten Bereich.

### 3.3.2.3 Spektraler Transmissionsgrad

Eine wichtige Voraussetzung für korrekte Emissionsgradmessungen ist die optische Undurchlässigkeit der Probe. Mit Hilfe von Messungen des spektralen Transmissionsgrades wurde diese Eigenschaft von „TE“, weiß überprüft. Die genannte Farbe wurde durch Rollen auf ein Steinsalzfenster bekannter Durchlässigkeit aufgetragen. Die Dicke der erzielten Schicht variiert örtlich zwischen 0,119  $\mu\text{m}$  und 0,174  $\mu\text{m}$ .

Die im Bild 11 dargestellten Messwerte zeigen über den gesamten spektralen Bereich von 2,5  $\mu\text{m}$  bis 20  $\mu\text{m}$  einen Transmissionsgrad kleiner als  $1 \cdot 10^{-3}$ . Somit darf die Farbe im genannten Spektralbereich als undurchlässig betrachtet werden.

### 3.3.2.4 Gesamtemissionsgrad

Der gerichtete Gesamtemissionsgrad wurde bei einer Temperatur von 23 °C und Richtungswinkeln 0°, 15°, 30°, 45°, 50°, 60°, 69°, 72° und 75° (bezogen auf die Normale zur Probenoberfläche) gemessen. Außerdem wurde der Gesamtemissionsgrad aus dem bei 60 °C gemessenen spektralen gerichteten Emissionsgrad durch Integration über die Wellenlänge berechnet. Diese Bestimmungsweise ist zulässig, da der Wellenlängenbereich der spektralen Messungen ca. 97 % der gesamten bei 60 °C emittierten Energie überdeckt. Beide Datensätze sind u.a. im Bild 12 dargestellt. Sie stimmen innerhalb ihrer Standardunsicherheiten überein.

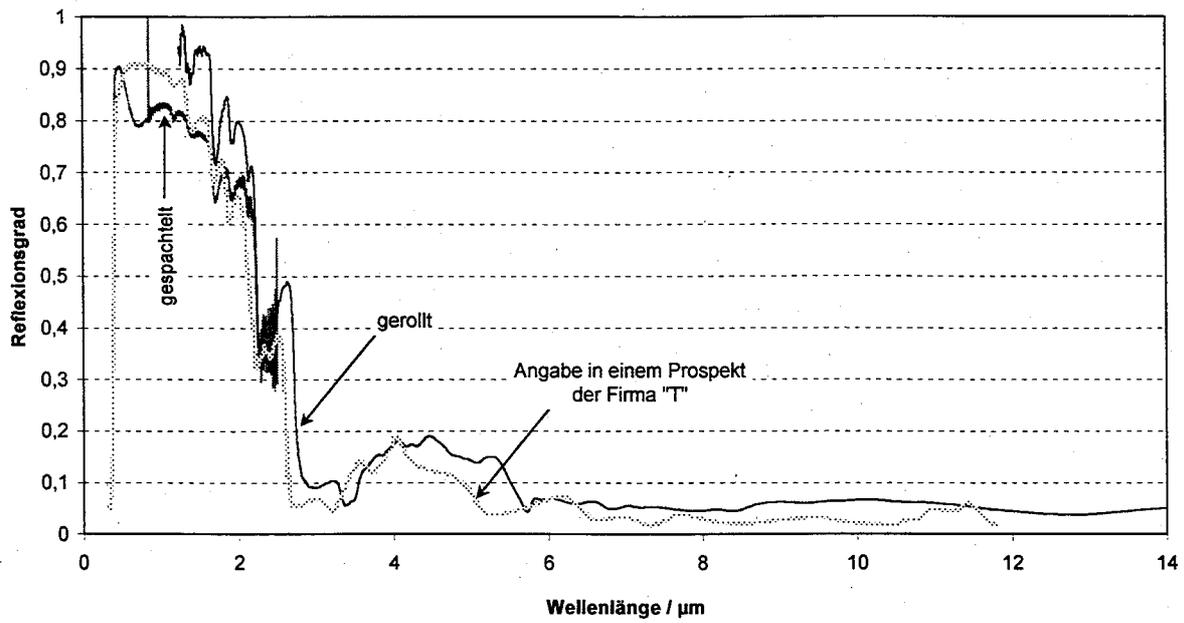


Abb. 9: Normal-hemisphärischer Reflexionsgrad von „TE“, weiß als Funktion der Wellenlänge (s.a. Text).

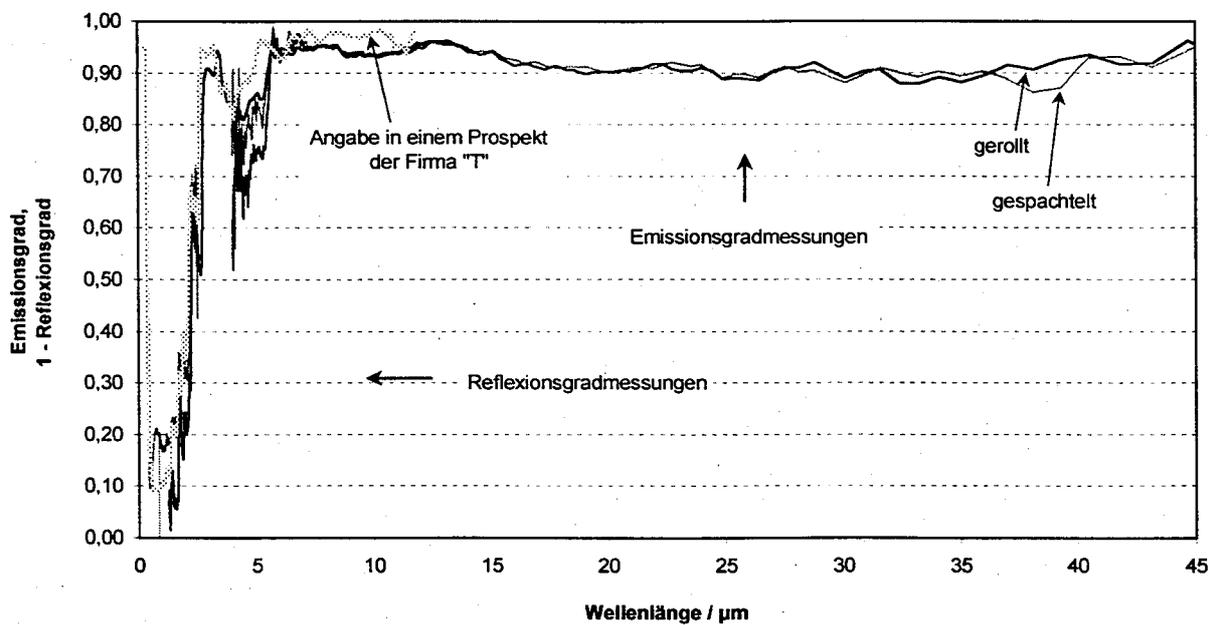


Abb. 10: Normaler Emissionsgrad von „TE“, weiß als Funktion der Wellenlänge (s.a. Text).

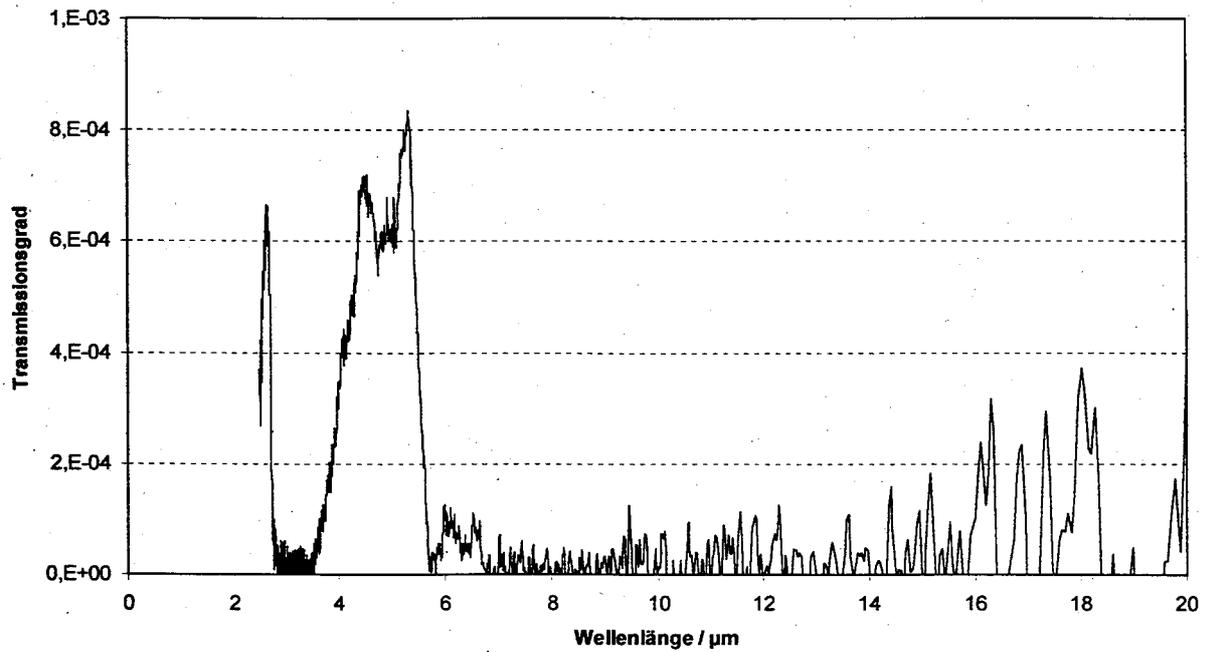


Abb. 11: Transmissionsgrad von „TE“, weiß einer Schichtdicke von 0,15 mm als Funktion der Wellenlänge.

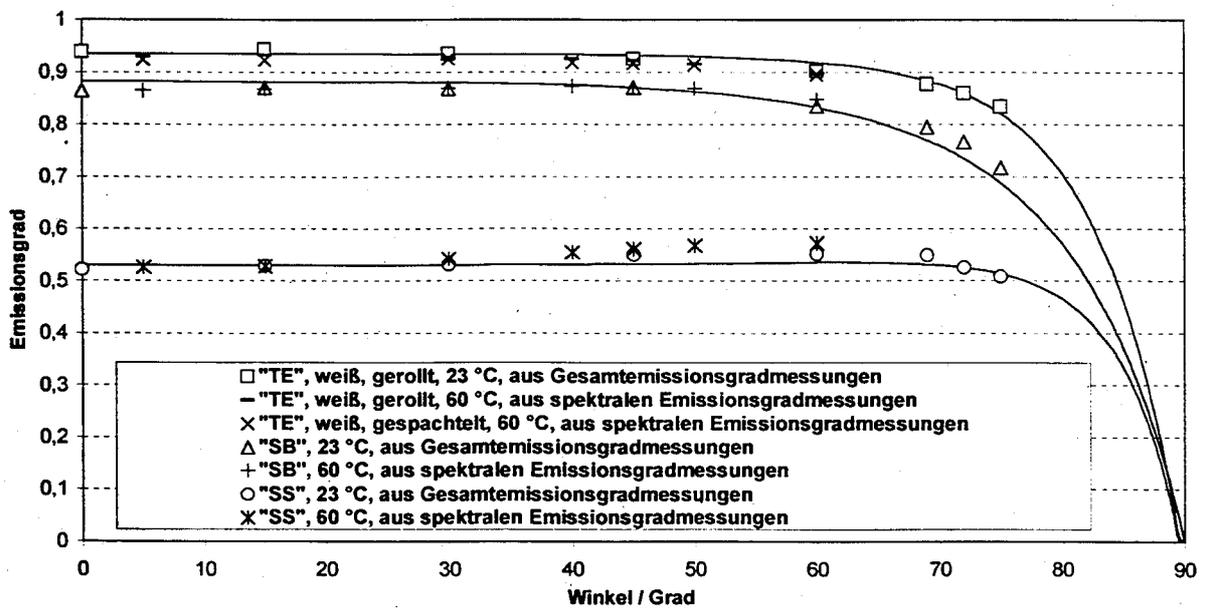


Abb. 12: Gerichteter Gesamtemissionsgrad als Funktion des Winkels.

Der gerichtete Gesamtemissionsgrad aller drei untersuchten Farben ist temperaturunabhängig im Bereich von 23 °C bis 60 °C. Bei „TE“, weiß ist er auch unabhängig von der gewählten Auftragsart (Rollen und Spachteln). Die Messwerte des gerichteten Gesamtemissionsgrads der drei Farben können jeweils an die Fresnel Gleichung angepaßt werden. Integrieren jeder Gleichung über den Halbraumwinkel liefert den hemisphärischen Gesamtemissionsgrad.

Die Zahlenwerte des gerichteten und des hemisphärischen Gesamtemissionsgrades sind in der Tabelle 3 zusammengefaßt. Die kombinierten erweiterten Unsicherheiten (mit Erweiterungsfaktor 2) des gerichteten und hemisphärischen Gesamtemissionsgrades betragen entsprechend 0,025 und 0,04.

**Tab. 3.** Gerichteter und hemisphärischer Gesamtemissionsgrad

$\vartheta$ / grad	„TE“, weiß	„SB“	„SS“
	$\varepsilon_{\vartheta}$	$\varepsilon_{\vartheta}$	$\varepsilon_{\vartheta}$
0	0,939	0,864	0,521
5	0,927	0,865	0,526
15	0,933	0,869	0,528
30	0,929	0,869	0,536
40	0,922	0,873	0,555
45	0,921	0,870	0,556
50	0,914	0,869	0,568
60	0,898	0,842	0,562
69	0,877	0,795	0,549
72	0,859	0,767	0,526
75	0,834	0,717	0,508
$\varepsilon_{\Omega}$	0,893	0,832	0,542

### 3.4 Bewertung

Die Wärmeleitfähigkeit ausgehärteter Farben auf Harzbasis liegt laut einschlägigen Tabellen (z.B. [10], [14]) zwischen 0,16 und 0,37  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  bei 20 °C. Mit der hier gemessenen Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,264 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  paßt „TE“, weiß genau in diesen Bereich hinein. Ebenso verhält es sich mit dem o.a. Messwert von „Calcoast Analytical-ITL Institut“ [8]. Baustoffe mit vergleichbarer Wärmeleitfähigkeit sind z.B. Gipskartonplatten mit 0,2  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  oder Gasbeton-Bauplatten mit 0,2 bis 0,3  $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  [10]. Wärmedämmstoffe haben Wärmeleitfähigkeiten, die um etwa eine Größenordnung niedriger sind.

Vergleicht man den Gesamtemissionsgrad der drei Farben „SS“, „SB“ und „TE“, so hat die erstgenannte den niedrigsten und die letztgenannte den größten Wert. Mit einem Gesamtemissionsgrad von 0,9 liegt „TE“ im Bereich üblicher Bauelemente ( $0,9 \pm 0,05$ ). Das

bedeutet, dass 90% der maximal möglichen Strahlungsenergie emittiert und ein ebensolcher Anteil absorbiert wird.

Der spektrale Emissionsgrad der untersuchten Beschichtung „TE“ stimmt zumindest im Bereich von 4 bis 15  $\mu\text{m}$  mit Tabellenwerten für weiße Acrylharz-Farbe auf rostfreiem Stahl sehr gut überein ([10], [14]).

Der relativ hohe Gesamtemissionsgrad von „TE“ führt dazu, dass es von den drei untersuchten Farben die höchste Temperaturstrahlung aufweist. Mit seinen sehr großen spektralen Emissionsgraden von 0,9 bis 0,95 im infraroten Bereich gibt „TE“ die Wärme an die Umgebung fast wie ein schwarzer Körper ab. Die niedrigen Werte des spektralen Emissionsgrades von 0,1 bis 0,2 im sichtbaren Bereich führen hingegen zu einer geringen Aufnahme von Sonnenenergie.

Hauser [11] kommt in seiner Untersuchung von „TE“ zu einem Emissionsgrad von  $\varepsilon = 0,9$  und findet einen Wärmedurchlaßwiderstand von  $R = 0,009 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$  für die 0,25 mm dicke Schicht (hier  $R = 0,0009 \text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ ).

Die in den Druckschriften von der Firma „T“ angegebenen Heizkosten-Einsparungen von bis zu 33% mit den Beschichtungen der Firma erscheinen aufgrund der relativ hohen Wärmeleitfähigkeit und/oder des großen Emissionsgrades des Materials nicht realistisch. Laut Kießl [12] ergeben sich für Bauwerksoberflächen mit insbesondere hellen Farben bei Erhöhung des solaren Absorptionsgrades bis etwa 0,4 und erst bei gleichzeitiger Reduzierung des Emissionsgrades bis unter 0,6 Verlustreduzierungen hinsichtlich der Wärmetransmission von 20 bis 25%.

Aufgrund der Messergebnisse und der davon abgeleiteten Bewertung seiner thermischen Transporteigenschaften ist „TE“ ungeeignet als Probenmaterial für die angestrebte Qualifizierung des THS-Verfahrens zur Prüfung von Beschichtungen. Zur Überprüfung dieses (negativen) Ergebnisses wurden Messungen mit dem THS-Gerät durchgeführt.

### 3.5 THS-Messungen

Als Trägermaterial für die Untersuchungen mit dem THS-Gerät wurde Pyrex-Glas mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 1,13 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  bei Raumtemperatur ausgewählt. Bei diesem Glas handelt es sich um das zertifizierte Referenzmaterial „CRM037“ [13].

Die Probe besteht aus zwei quaderförmigen Hälften von je  $100 \times 30 \times 30 \text{ mm}^3$ , zwischen denen der Heizstreifen eingelegt wird. Sie wurde in Luft bei Raumtemperatur unter sonst gleichen Bedingungen dreimal gemessen: Die erste Messung erfolgte an der unbehandelten (nackten) Probe („N“). Danach wurde diese mit 4-mm dicken Hartschaum (sog. Randstreifen für Fußböden o.ä.,  $\lambda = 0,042 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) eng umgeben und erneut gemessen („HS“). Nach dem Entfernen dieses Dämmmaterials wurde auf die Außenflächen gemäß den Verarbeitungsrichtlinien „TE“, weiß so aufgetragen, daß sich eine mittlere Schichtdicke von etwa 0,3 mm ergab („TS“). Abschließend wurde wieder gemessen.

Die Ergebnisse sind im Bild 13 wiedergegeben. Dargestellt ist die Temperaturerhöhung (gemessen gegen Raumtemperatur) des Streifens als Funktion des natürlichen Logarithmusses der Zeit ( $\ln t$ ). Zwischen  $t_{\min} = 20 \text{ s}$  und  $t_{\max} = 430 \text{ s}$  sind die drei aufgezeichneten Signale im Rahmen der Streubreite (max. 0,1%) gleich. Innerhalb dieses Zeitfensters ist die thermische

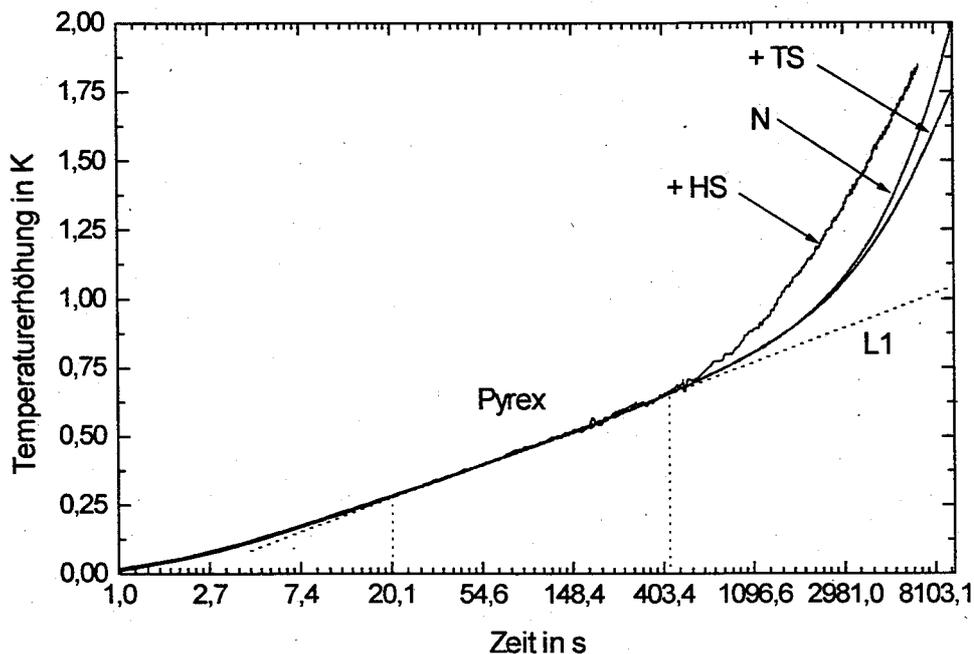


Abb. 13: THS-Signale als Funktion von  $\ln t$  für eine Pyrex-Glas-Probe mit unterschiedlich präparierten Außenflächen.

Wirkung des Streifens auf die Glas-Probe beschränkt. Es läßt sich die Gerade (L1) anpassen, deren Steigung  $m$  gemäß Gl. (7) ein Maß für die Wärmeleitfähigkeit von Pyrex ist. Man erhält den oben genannten Referenzwert mit einer Abweichung von unter 1%.

Oberhalb von  $t_{\max}$  trennen sich die drei Signale von der eingezeichneten Geraden, dem Signal einer unbegrenzten Probe. Das bedeutet daß die Wärme front nunmehr die äußere Oberfläche der gemessenen Probe erreicht und überschritten hat.

Im Fall der nackten Probe (N) wird nun vermehrt Wärme an die Umgebung abgegeben. Da dieser Übergang (Leitung, Konvektion, Strahlung) schwächer ist als die reine Leitung im Pyrex, steigt die Temperatur des Streifens schneller an; der Wärmeverlust des Systems ist geringer. Aus dem Signal (N) läßt sich durch Anpassen an das vorliegende analytische Modell [15] und ebenso durch Finite-Elemente-Rechnungen der Wärmeübergangskoeffizient des Systems bestimmen. Man erhält aus beiden Verfahren in guter Übereinstimmung den Wert  $\alpha = 14 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-2}$  für die beschriebene Messanordnung.

Die mit (HS) gekennzeichnete Temperatur des Streifens im Hartschaum-isolierten Pyrex steigt oberhalb von  $t_{\max}$  im Vergleich der drei Signale am steilsten an. Das bedeutet, daß die Wärmeleitung in der Schaumschicht, erstens, viel geringer ist als im Pyrex (HS $\leftrightarrow$ L1) und, zweitens, ebenfalls geringer ist als der Wärmeübergang zum Labor (HS $\leftrightarrow$ N). Tatsächlich ist die Wärmeleitfähigkeit des verwendeten Hartschaums etwa 25-mal geringer als diejenige von Pyrex. Der Wärmeverlust des Systems ist hier deutlich am geringsten. Zur Zeit wird an einer analytischen und numerischen (FEM) Beschreibung für Signalverläufe wie (HS) und (TS) gearbeitet. Die mit (TS) gekennzeichnete Kurve beschreibt das Verhalten der „TE“ Beschichtung

auf Pyrex. In diesem Versuch fällt der Wärmeverlust des Systems zur Umgebung sogar noch etwas höher aus als bei der nackten Probe. Das mag an der noch bestehenden relativ hohen Streuung von THS-Messungen an Raumluft zurückzuführen sein. Die behauptete Wärmeverlustreduzierung ist jedoch auch mit diesem Versuch nicht nachzuweisen.

## 4 Zusammenfassung

Zur Qualifizierung des Heizstreifenverfahrens (THS) als Messmethode zur Untersuchung der Wärmedämmeigenschaften von Thermobeschichtungen für den baulichen Wärmeschutz wurde die Farbe „TE“, weiß der Firma „T“ als Probenmaterial ausgewählt: Folgende Gründe waren für diese Entscheidung ausschlaggebend: Laut Angaben des Herstellers wirkt die genannte Farbe nicht nur wegen ihrer äußerst geringen Wärmeleitfähigkeit stark dämmend, sondern darüberhinaus auch wegen ihrer besonderen optischen Eigenschaften. Einsparungen von bis zu 33% der Heizkosten sollen angeblich möglich sein. Aufgrund dieser reklamierten Eigenschaften wäre mit einem deutlichen experimentellen Ergebnis bei der beabsichtigten Qualifizierung des THS-Verfahrens zu rechnen gewesen.

Zwei weitere Farben, die LEP's (low emissivity paint) „SB“ und „SS“ dienten als Vergleichsproben für die optischen Größen.

Zunächst wurden mit herkömmlichen Verfahren Referenzwerte an den drei unterschiedlichen Farben gemessen. Es wurden die folgenden thermischen und optischen Eigenschaften bestimmt: spektraler Emissionsgrad, spektraler Reflexionsgrad, spektraler Transmissionsgrad, Gesamtemissionsgrad und die Wärmeleitfähigkeit (nur „TE“). Nach Abschluß dieser Voruntersuchungen ergab sich folgender Befund:

Die Farbe „TE“, weiß ist aufgrund ihrer thermischen und optischen Eigenschaften zur Qualifizierung des Heizstreifenverfahrens nicht geeignet. Statt der angegebenen Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,000152 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  wurde bei z.B.  $10^\circ\text{C}$  der Wert  $\lambda = 0,264 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  gemessen.

Der Emissionsgrad ist über den gesamten interessierenden Wellenlängenbereich nicht kleiner als 0,9, was einen üblichen Wert für Baustoffe darstellt. Für die angestrebte Qualifizierung sollte das Probenmaterial eine Wärmeleitfähigkeit aufweisen, die im Bereich derjenigen für Dämmstoffe liegt und/oder einen Emissionsgrad von unter 0,6 zeigt.

Mit dem THS-Verfahren konnte immerhin gezeigt werden, daß eine mit „TE“, weiß beschichtete Pyrex-Probe sich in ihren thermischen Eigenschaften von der unbeschichteten (nackten) Probe nicht wesentlich unterscheidet.

Messtechnisch konnte somit keine Wirkung der Beschichtung „TE“ hinsichtlich des Wärmeschutzes nachgewiesen werden.

Die begleitenden theoretischen Untersuchungen haben neben ersten Finite-Elemente Simulationen zum Wärmeübergangskoeffizienten zu analytischen Gleichungen für die beiden zu erwartenden Grenzfälle isothermer und adiabatischer Randbedingungen geführt.

Die vorliegenden theoretischen und experimentellen Ergebnisse zeigen, dass das THS-Verfahren durchaus das technische Potential zur Messung der thermischen Eigenschaften von Beschichtungen und anderen Zweistoffsystemen besitzen kann.

Die Ergebnisse und Bewertungen des vorliegenden Abschlußberichts beziehen sich ausschließlich auf das untersuchte Probenmaterial zum Zeitpunkt der Untersuchungen.

Braunschweig, 21.10.1999

## 5 Literatur

- [1] S. E. Gustafsson, E. Karawacki, und M. N. Khan, *J. Phys. D* **12**:1411 (1979).
- [2] U. Hammerschmidt, in Proceedings 24<sup>th</sup> Int. Thermal Cond. Conf., Pittsburgh, 1997, P. S. Gaal, ed. (Technomic, Lancaster, 1999).
- [3] U. Hammerschmidt, S. Sabuga, zur Veröff. angenommen in *Int. J. Thermophys.*
- [4] U. Hammerschmidt, interne Unterlagen zur Qualitätssicherung
- [5] J. Lohrengel, *Wärme- und Stoffübertragung*, **21**:1 (1987)
- [6] J. Lohrengel, R. Todtenhaupt und R. Ragab, *Wärme- und Stoffübertragung*, **28**:321 (1987)
- [7] versch. Datenblätter der Firma Weilheimer Lackfabrik \*)
- [8] versch. Datenblätter der Firma „T“ \*)
- [9] Leonidowitsch, G. M.; Wladimirowitsch, B. J., Gutachten für Firma „T“
- [10] W. Blanke (Herausg.) in *Thermophysikalische Stoffgrößen*, Springer Verlag, Berlin, 1998
- [11] Hauser, G.: Die Wirkung einer „T“-Beschichtung auf den Wärmeschutz von Bauteilen, Prüfbericht PB-SO 22/98
- [12] K. Kiefl, Rede auf dem Bauphysik-Symposium am 10. Nov. 1998 in Sindelfingen, auszugsweise in *Bauphysik*, **21**:86 (1999)
- [13] I. Williams und R. E. Shawyer, Certification report for a Pyrex glass reference material for thermal conductivity between -80 °C and 200 °C (CRM 039), bcr information *Reference Materials*, Report EUR 13358 (1991).
- [14] Y. S. Touloukian, R. W. Powell, C. Y. Ho, und P. G. Klemens, in *Thermophysical Properties of Materials* (Plenum Press, New York, 1970), Vol. 12, p. 992.
- [15] H. Tautz, in *Wärmeleitung und Temperatursausgleich* (Verlag Chemie GmbH, Weinheim, 1971)

\*) Die zitierten Datenblätter und Druckschriften liegen den Verfassern vor.