

## Schutzschlauch Alutex

### Physik der Wärmeübertragung

Bei der Entwicklung der Alutex- Schutzschläuche haben sich während der Verifizierung einzelner Muster zunächst näher, nicht zu erklärende Phänomene in der Messung der Innentemperatur gezeigt. Dies hat die Frage nach der Ursache aufgeworfen. Daraus ist die nachfolgende Betrachtung entstanden. In Bild 1 ist der Meßaufbau und das Ergebnis für die einzelnen Messungen dargestellt.

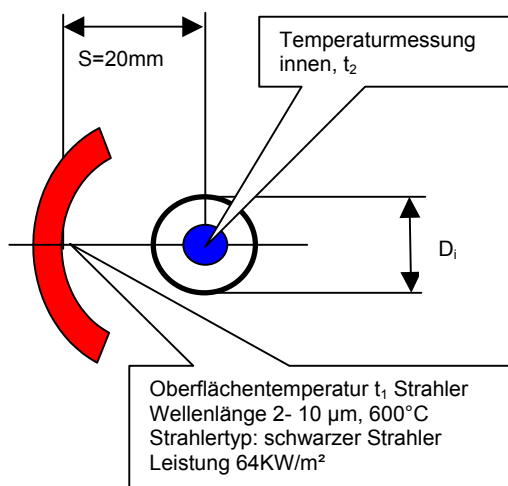
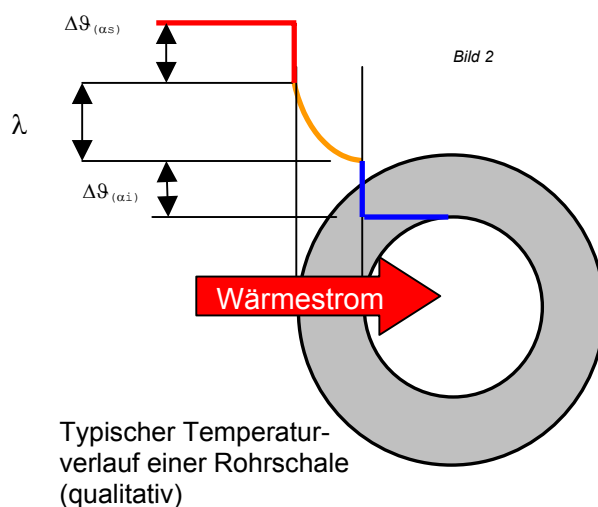


Bild 1

Tabelle 1

Messung	Dicke Glas (Wand) [mm]	Oberfläche/ Kaschierung				Beharrungs-temperatur $t_2$ [°C]	Visuelle/ manuelle Beurteilung nach Wärmelagerung		
		Band	Kleber	Typ	Dicke [ $\mu\text{m}$ ]		24h/ 200°C	48h/ 200°C	24h/ 250°C
11	0,6	Reinalu	Polysiloxan	4	50	80	+++	+++	++
12	0,6	Reinalu	Acrylat	1	30	84	+++	+++	+
13	1,0	Reinalu	Acrylat	1	30	78	+	+	+
14	0,6	Reinalu	Acrylat	2	80	81	++	++	+
15	1,0	Reinalu	Polysiloxan	4	50	76	+	+	++
16	0,6	Reinalu	Acrylat	3	30	72	++	++	+
17	0,6	<b>Draht umstrickt, Bedeckung ca. 20%</b>				<b>224</b>	+++	+++	+++
18	1,4	PET- Trägerfolie Alu bedampft	Acrylat		120	94	0	0	+

Bei Betrachtung des Wärmeübergangs in/ an Rohrkörpern, gemäß *Bild 2* ist zu erkennen, daß die Wärmedurchgangszahl  $K$ , die sich sowohl aus dem Wärmeleitwiderstand  $R_w$  als auch aus den Wärmeübergangszahlen  $\alpha_a$  und  $\alpha_i$  zusammensetzt, die maßgebliche Größe für die Temperaturdifferenz zwischen dem „heißen“ Strahler und dem „kalten“ Innenschlauch ist.



Verwendete Formelzeichen und Konstanten	
$\Delta\vartheta_{(\alpha_s)}$	Temp.-Differenz Strahlung/ Oberfläche [K]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit [W/(K·m)]
$\Delta\vartheta_{(\alpha_i)}$	Temp.-Differenz Oberfläche/ innen [K]
$T_1$	Temperatur des Strahlers [K]
$T_2$	Temperatur Produkt [K]
$A_a$	Fläche Rohr außen [m <sup>2</sup> ]
$A_i$	Fläche Rohr innen [m <sup>2</sup> ]
$A_m$	Mittlere Fläche Rohr [m <sup>2</sup> ]
$\Delta$	Differenz
$\alpha_a$	Wärmeübergang außen [W/(m <sup>2</sup> · K)]
$\alpha_i$	Wärmeübergang innen [W/(m <sup>2</sup> · K)]
$\alpha_s$	Wärmeübergang Strahlung [W/(m <sup>2</sup> · K)]
$\vartheta$	Temperatur [°C]
$\alpha_k$	Wärmeübergang außen, konvektiv [W/(m <sup>2</sup> · K)]
$K$	Wärmedurchgangswiderstand [W/(m <sup>2</sup> · K)]
$\delta$	Wandstärke ( $r_a - r_i$ ) = s [m]
$r_a$	Radius außen [m]
$r_i$	Radius innen [m]
$l$	Länge [m]
$C$	Emmissionskonstante, stoffbezogen [W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )]
$C_s$	Schwarzer Strahler 5,77 [W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> )] ( <i>Quelle 2</i> )
$\varepsilon$	Emissionszahl, stoffspezifisch
$R_w$	Wärmeleitwiderstand [K/W]

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist eine Stoffkonstante und unabhängig von der Wandstärke des Schlauchs. Dieses trifft auch für den Wärmeübergang  $\alpha_i$  an der Innenseite des Schlauchs zu (Temperaturunterschiede innen können vernachlässigt werden). Für die Interpretation der in *Tabelle 1* dargestellten Meßergebnisse bedarf es zunächst der qualitativen Betrachtung der *Gleichung 1*.

$$\frac{1}{k \cdot A_a} = \frac{1}{\alpha_i \cdot A_i} + \frac{\delta}{\lambda \cdot A_m} + \frac{1}{\alpha_a \cdot A_a}$$

*Gleichung 1*  
*Quelle 1*

Für die Betrachtung ist es empfehlenswert, die Gleichung elementweise zu betrachten.

$$\frac{1}{\alpha_i \cdot A_i}$$

Unter Berücksichtigung der zuvor gemachten Feststellung, daß der Wärmeübergang an der Innenseite des Schlauch als annähernd gleich anzusehen ist (Temperaturunterschiede innen können vernachlässigt werden), wird dieser Teil der Gleichung nicht weiter betrachtet.

$$\frac{\delta}{\lambda \cdot A_m}$$

Unter Berücksichtigung der zuvor gemachten Feststellung, ist bei der Betrachtung des Wärmedurchgangswiderstand  $R_w$  nur die Geometrie von Einfluß, da die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  als Stoffkonstante nicht weiter betrachtet wird.

$$\frac{\delta}{A_m}$$

Relevant für die qualitative Einschätzung ist bei vergleichbarem Innendurchmesser nur die Wandstärke  $\delta$  des Glasseidenschlauchs. Deshalb wird nur nebenstehender Restausdruck weiter betrachtet.

Mit zuvor genannten Beziehungen und Feststellungen ergibt sich *Gleichung 2*.

$$R_w \cdot \lambda = \frac{\delta}{A_m}$$

*Gleichung 2*  
Quelle 1

$$A_m = \frac{A_a - A_i}{\ln \frac{A_a}{A_i}}$$

*Gleichung 3* ( $A_{(r)} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$ ) (*Gleichung 3a*)  
Quelle 1

Der Einfluß der Wandstärke, d. h. Dicke des Glasschlauches, ergibt sich für verschiedene Wandstärken gemäß *Gleichung 2*. Die Betrachtungslänge ist jeweils 1m.

Innen-Ø [mm]	Wand [mm]	$r_a$ [m]	$r_i$ [m]	$A_a$ [m <sup>2</sup> ]	$A_i$ [m <sup>2</sup> ]	$A_m$ [m <sup>2</sup> ]	$\delta$ [m]	$R_w \cdot \lambda$ [m <sup>-1</sup> ]
14,0	1,4	$8,4 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-3}$	0,05278	0,04398	0,04825	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$7,68 \cdot 10^{-3}$
	1,0	$8,0 \cdot 10^{-3}$		0,05027		0,04705	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$7,49 \cdot 10^{-3}$
	0,6	$7,6 \cdot 10^{-3}$		0,04775		0,04584	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$7,30 \cdot 10^{-3}$

Tabelle 2

Auch ohne genaue Kenntnis über die Werkstoffkonstante  $\lambda$  (faktorieller Einfluß) kann aufgrund der geringen Unterschiede festgestellt werden, daß die **Wandstärke keinen signifikanten Einfluß auf die Innentemperatur** im betrachteten System hat. Dieses ist auch durch die Meßergebnisse belegt.

$$\frac{1}{\alpha_a \cdot A_a}$$

Die Fläche  $A_a$  ist bei den betrachteten Versuchen vergleichbar. Die Umgebungsbedingungen entsprechen bei allen Messungen einander. Somit ist hier nur der Wärmeübergangswert  $\alpha_a$  zu betrachten.  $\alpha_a$  setzt sich zusammen aus  $\alpha_a$  und  $\alpha_k$ . Der konvektive Wärmeübergang  $\alpha_k$  ist für alle Messungen gleich und spielt bei kleiner Strömungsgeschwindigkeit und großer Strahlungstemperatur keine wesentliche Rolle und wird somit nicht weiter betrachtet.

Maßgeblichen Einfluß auf die Innentemperatur muß demnach der Wärmeübergangswert der Strahlungswärme haben, d. h. das Absorptionsverhalten bzw. Reflektionsverhalten der Außenfläche ist der wesentliche Einflußfaktor des gesamten Schlauchs. Dieses wird definiert über  $\alpha_s$ . *Gleichung 4* ist die quantitative Bestimmung am Beispiel eines *Alutex*- Schlauchs im Vergleich mit einem Glaseidenschlauch mit Drahtbedeckung, ca. 20%, d. h. 80% der Schlauchs „sehen“ den Strahler. Dabei wird das  $\Delta\theta$  der Schlauchwandung vernachlässigt und die gemessene Innentemperatur als  $T_2$  angenommen.

$$\alpha_s = C \frac{(T_1/100) \exp 4 - (T_2/100) \exp 4}{T_1 - T_2}$$

*Gleichung 4*  
Quelle 2

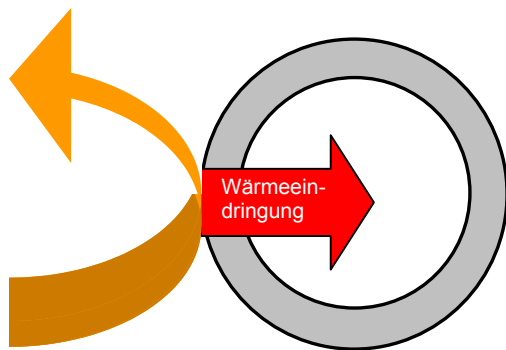
$$C = C_s \cdot \varepsilon$$

*Gleichung 4a*  
Quelle 2

Muster	$t_1$ [°C]	$t_2$ [°C]	$T_1$ [K]	$T_2$ [K]	$\varepsilon$ (Quelle 1)	$\alpha_s$ [W/(m·K)]
12	600	84	873	297	0,039	2,47
17		224		597	0,940	60,09

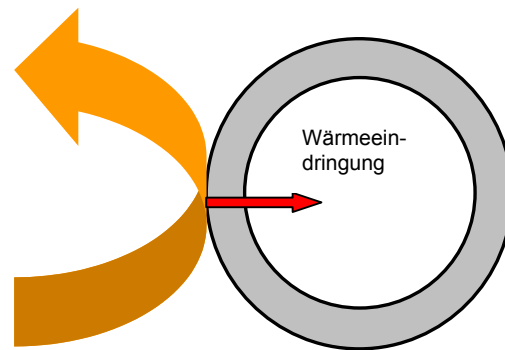
Tabelle 4

Nachfolgend ist schematisch dargestellt, wie sich unterschiedlich reflektierende Oberflächen in Bezug auf Wärmefluß und daraus resultierender Innentemperatur verhalten.



Typischer Wärmestrom durch eine Rohrschale bei **Wärmestrahlung** mit großer Emissionskonstante ( $C >$ )

Bild 3



Typischer Wärmestrom durch eine Rohrschale bei **Wärmestrahlung** mit niedriger Emissionskonstante ( $C <$ )

Bild 4

Folgende Erkenntnisse können aus den Messungen und theoretischen Überlegungen gezogen werden.

- Je kleiner der k- Wert ist um so geringer ist der Wärmefluß und somit die Temperatur im Schlauch.
- Die Dicke der Glasseide (Wandstärke) hat einen untergeordneten Einfluß auf die Innentemperatur, insbesondere bei Strahlungswärme.
- Die Reflektionseigenschaften der Oberfläche haben einen herausragenden Einfluß auf die Innentemperatur bei Strahlungswärme. Je besser die stoffspezifische Emissionszahl  $\varepsilon$  ist um so geringer ist die Innentemperatur. Hier hat der Metallumstrickte Schlauch einen nicht zu verleugnenden konstruktiven Nachteil.
- Eine Reinalu- Kaschierung ist Einer, mit einer polymeren Trägerfolie und aufgedampfter Alu- Schicht immer vorzuziehen, da bei partieller thermischer Überbeanspruchung die Trägerfolie zu einer Trübung der äußert dünn aufgedampften Alu- Schicht führt, was wiederum die Funktion des Schlauches, nämlich sein Wärmereflektionsvermögen, signifikant negativ beeinflusst.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen haben *Alutex*- Schläuche einen relativ dünnwandigen Glasseiden-Innenschlauch mit einer Reinalu- Kaschierung. Je nach Anwendung kann auf einen Acrylat- Kleber, der bei thermischer Überbeanspruchung versintert, oder einen Polysiloxan- Kleber zurückgegriffen werden.