

WS/SS 19....- ....	Universität Hannover Institut für Elektrowärme	Name:	
	Elektrowärmelabor I	Matr.-Nr.:	
Versuch T7	Thermoelektrische Analogie	Dat.:	Gr.:
Versuchsleiter:		Testat:	

## Inhalt

1	Geräte und Zubehör	Seite	1
2	Analogie zwischen thermischen und elektrischen Systemen	Seite	2
3	Aufgabenstellung	Seite	8

## 1 Geräte und Zubehör

- 1 Transistor (2 N 3055) auf Kühlblech isoliert montiert mit NiCr-Ni-Thermoelement zwischen Transistorgehäuseboden und Isolierplättchen sowie Anschlußkästchen für Betrieb
- 1 Transistor 2 N 3055 (TO 3)
- 1 Isolierplättchen (Glimmer 100  $\mu\text{m}$  dick)
- 1 Kühlkörper
- 1 Kalorimeter aus Styropor mit Plexiglas-Einsatz
- 1 Waage
- 2 Dewargefäße
- 1 Miniaturthermometer 0...100°C
- 1 Thermometer 0...100°C
- 1 Vergleichsstelle für Thermoelement
- 1 Präzisionsleistungsmesser
- 3 Netzgeräte Konstanter T 2 (Siemens) 33 V/0,15 A
- 1 Netzgerät Konstanter Schroff 33 V/1 A
- 1 Lüfter mit Leistungspotentionmeter
- 1 Impulsgeber für Impulsbetrieb
- 1 X-t - Schreiber (Philips)
- 1 Ausschalter im Gehäuse für Impuls/Dauerbetrieb

## 2 Analogie zwischen thermischen und elektrischen Systemen

Da es oft nicht möglich ist, Temperaturen an jeder gewünschten Stelle in einem System zu bestimmen, z.B. durch Messung mit Thermometer oder Thermoelement, muß nach einer anderen Möglichkeit gesucht werden, um die Temperatur an unzugänglichen Stellen, wie z.B. der Sperrschicht eines Transistors, zu bestimmen.

Dabei bietet sich das Verfahren der Thermoelektrischen Analogie auf Grund der Ähnlichkeit der zugehörigen Differentialgleichungen für elektrische und thermische Vorgänge an. Diese lauten

$$\Delta\vartheta = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot \frac{\delta\vartheta}{\delta t} \quad \text{bzw.} \quad \Delta U = R' \cdot C' \cdot \frac{\delta U}{\delta t}$$

mit

$$\begin{aligned} c &= \text{spezif. Wärmekapazität} \left[ \frac{J}{g \cdot K} \right] & R' &= \text{Widerstandsbelag} \left[ \frac{\Omega}{m} \right] \\ \rho &= \text{Dichte} \left[ \frac{g}{m^3} \right] & C' &= \text{Kapazitätsbelag} \left[ \frac{F}{m} \right] \\ \lambda &= \text{Wärmeleitfähigkeit} \left[ \frac{W}{K \cdot m} \right] \end{aligned}$$

Beide Gleichungen haben dieselbe mathematische Form. Die physikalischen Vorgänge haben demnach den gleichen zeitlichen Verlauf, wobei

$$R' = \frac{1}{\lambda} \quad \text{und} \quad C' = c \cdot \rho$$

zu setzen ist.

Diese Analogie bleibt auch bestehen, wenn statt der Kapazitäts- und Widerstandsbeläge diskrete Bauelemente (Beuken-Modell) benutzt werden. Um die zueinandergehörenden elektrischen und thermischen Größen zu bestimmen, betrachten wir den einfachsten Fall, daß das System, bestehend aus einem Speicher und einem Widerstand, mit konstantem Eingangsstrom beaufschlagt wird.

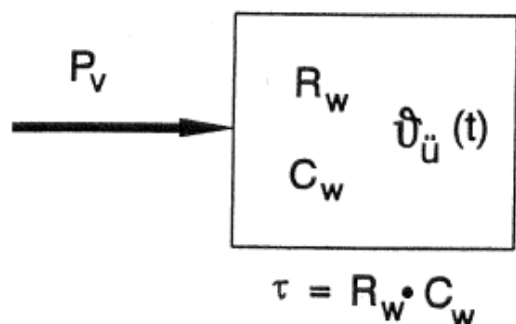


Abb. 1: Thermisches Modell

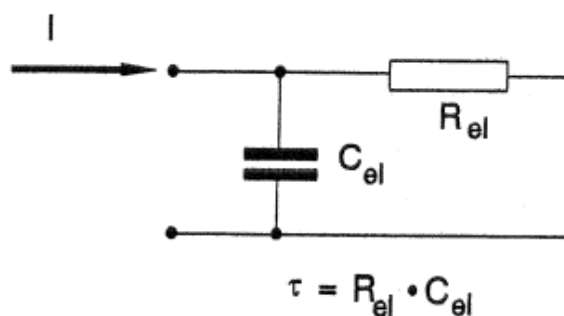


Abb. 2: Elektrisches Analogiemodell

Die Lösungen der DGL. lauten:

$$\vartheta_{\ddot{u}} = P_v \cdot R_w \left( 1 - e^{-\frac{t_w}{R_w \cdot C_w}} \right)$$

$$U(t) = I \cdot R_{el} \left( 1 - e^{-\frac{t_{el}}{R_{el} \cdot C_{el}}} \right)$$

Man kann nun die Koeffizienten beider Gleichungen miteinander vergleichen und erhält so die analoge Zuordnung:

Wärmekapazität	$C_w \left[ \frac{J}{K} \right]$	el. Kapazität	$C_{el} \left[ \frac{As}{V} \right]$
Wärmewiderstand	$R_w \left[ \frac{K}{W} \right]$	el. Widerstand	$R_{el} \left[ \frac{V}{A} \right]$
Wärmeleistung	$P_v \text{ [W]}$	el. Strom	$I \text{ [A]}$
Temperatur	$\vartheta_{\ddot{u}} \text{ [K]}$	el. Spannung	$U \text{ [V]}$
therm. Zeit	$t_w \text{ [s]}$	el. Zeit	$t_{el} \text{ [s]}$

Da unter ungünstigen Bedingungen beim elektrischen Modell sehr große Kapazitäten, die schlecht herzustellen sind, auftreten können, führt man, wie beim Analogrechner üblich, Maßstabsfaktoren ein.

Es werden folgende Maßstabsfaktoren  $\eta$ ,  $\gamma$  und  $\epsilon$  eingeführt:

$$\eta = \frac{\tau_w}{\tau_{el}} \quad ; \quad \gamma = \frac{\vartheta_{\ddot{u}}}{U} \left[ \frac{K}{V} \right] \quad ; \quad \epsilon = \frac{P_v}{J} \text{ [V]}$$

Man kann nun  $\eta$ ,  $\gamma$  und  $\epsilon$  in die Gleichung für den thermischen Ablauf einsetzen

$$\dot{\theta}_{\bar{u}} = P_v \cdot R_w \left( 1 - e^{-\frac{t_w}{R_w \cdot C_w}} \right)$$

und erhält:

$$\gamma \cdot U = \epsilon \cdot J \cdot R_w \left( 1 - e^{-\frac{\eta t_{el}}{R_w \cdot C_w}} \right)$$

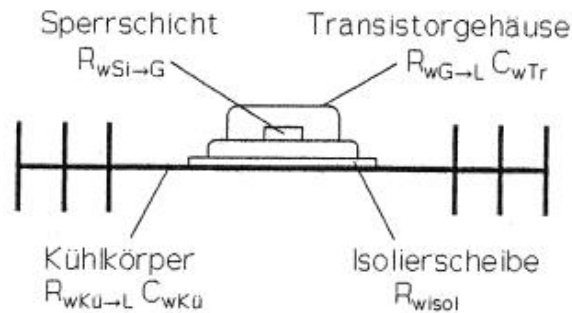
Aus einem Koeffizientenvergleich mit der elektrischen Gleichung

$$U = I \cdot R_{el} \left( 1 - e^{-\frac{t_{el}}{R_{el} \cdot C_{el}}} \right)$$

findet man

$$R_{el} = R_w \cdot \frac{\epsilon}{\gamma} \quad \text{und} \quad C_{el} = C_w \cdot \frac{\gamma}{\eta \cdot \epsilon}$$

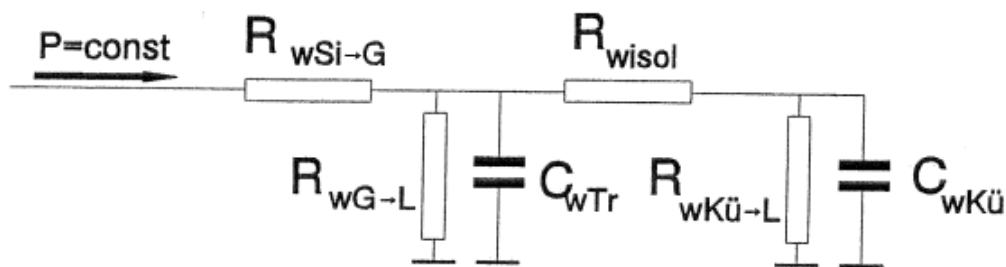
Aus diesen Gleichungen ersieht man, daß eine Verkleinerung von  $R$  bzw.  $\epsilon/\gamma$  eine Vergrößerung von  $C_{el}$  zur Folge hat, wenn der Zeitmaßstab erhalten bleiben soll. Weiterhin erkennt man die Möglichkeit, durch den Faktor auf den Zeitablauf des Analogievorganges Einfluß zu nehmen. So können sehr langsam verlaufende Vorgänge im Modell beschleunigt werden, wenn hinreichend schnelle Meßgeräte zur Verfügung stehen. Für ein beliebiges thermisches System muß zur Messung zuerst das elektrische Ersatzschaltbild gefunden werden. Aus den bekannten thermischen Größen ( $C_w$ ,  $R_w$ ,  $t_w$ ) werden nun die elektrischen mit Hilfe der Maßstabsfaktoren gebildet. Dabei ist auf eine sinnvolle Dimensionierung der Bauteile und auch der Zeitabläufe zu achten. An dem elektrischen Modell können jetzt Ströme und Spannungen sowohl statisch als auch dynamisch gemessen werden. An den Größen Strom und Spannung werden dann durch Rücktransformieren die Größen Temperatur und Leistung im realen System bestimmt.



**Abb. 3:** Transistor auf Kühlkörper

Wie Abb.3 zeigt, besteht das zu untersuchende thermische System aus einem Standard-Leistungstransistor vom Typ 2 N 3055 und einem Aluminium-Kühlkörper. Zwischen Kühlkörper und Transistor befindet sich zur elektrischen Isolation eine Glimmerscheibe von  $100 \mu\text{m}$  Dicke. Um einen guten Wärmeübergang zu gewährleisten, sind die thermischen Kontaktflächen zwischen Glimmer und Metall jeweils mit Wärmeleitpaste bestrichen.

Aus Abb.3 leitet sich folgendes thermische Ersatzschaltbild ab:



**Abb. 4:** Thermisches Ersatzschaltbild

Hierin bedeuten:

- $C_{ws}$  : Wärmekapazität der Siliziumsperrschicht
- $C_{Tr}$  : Wärmekapazität des übrigen Transistorsystems (einschl. Gehäuse)
- $C_{wKü}$  : Wärmekapazität des Kühlblechs
- $R_{wSi→G}$  : Wärmewiderstand zwischen Siliziumsperrschicht und Gehäuse
- $R_{wG→L}$  : Wärmewiderstand zwischen Gehäuse und Luft
- $R_{wisol}$  : Wärmewiderstand der Isolationsschicht
- $R_{wkühl→L}$  : Wärmewiderstand des Kühlkörpers gegen Luft

Von diesen Daten sind einige den Datenbüchern zu entnehmen, die übrigen sind zu berechnen. Gegeben sind:

**Für den Transistor:**

$P_{zul}$  115 W bei  $\vartheta_{Geh.} = 25^\circ C$   
 $\vartheta_{max\ Si}$   $200^\circ C$   
 $R_{wSi \rightarrow G}$  1,5 K/W  
 $R_{wG \rightarrow L}$  50 K/W

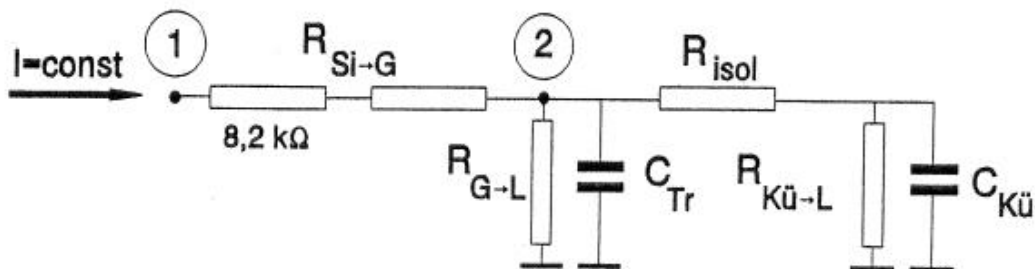
**Materialdaten:**

Spezifische Wärmekapazitäten in [J/g·K] von  
 Aluminium : 0,896  
 Stahl : 0,461  
 Wasser : 4,19

Die Wärmekapazität des Transistors wird berechnet und parallel mit einem Kalorimeter gemessen. Für das Kalorimeter gilt folgende Gleichung:

$$c_{Tr} \cdot m_{Tr} (\vartheta_{Tr} - \vartheta_u) = c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} (\vartheta_{misch} - \vartheta_u) + c_{Tr} \cdot m_{Tr} (\vartheta_{misch} - \vartheta_u)$$

Aus dieser Gleichung kann die Wärmekapazität des Transistors berechnet werden. Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers wird in einer gesonderten Messung bestimmt. Die Wärmekapazität ist aus Masse und spezifischen Wärmekapazität zu berechnen. Nun sind die Maßstabsfaktoren  $\eta, \gamma$  und  $\epsilon$  so zu wählen, daß im elektrischen Modell sinnvoll dimensionierte Bauelemente verwendet werden können. Einer konstanten Leistung im thermischen Fall entspricht ein konstanter Strom. Der in das System hineinfließende Strom wird über den Spannungsabfall an einem Präzisionswiderstand von 8,2 k $\Omega$  gemessen.



**Abb. 5:** Prinzipielle Analogieschaltung

An Punkt 2 kann der zeitliche Verlauf der Gehäusebodentemperatur bzw. -Spannung aufgenommen werden. In einem Vergleich mit dem Verlauf der Temperatur am realen Transistor kann die Genauigkeit des Verfahrens abgeschätzt werden.

An Punkt 1 entsteht eine Spannung, die der gesuchten Sperrschichttemperatur proportional ist.