

KfK 5222
Januar 1994

Elektrische Schaltung zur Simulation des Temperaturverhaltens einer Heizstrecke für den Einsatz in einem Simulationsprogramm

W. Rapp
Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Angewandte Thermo-und Fluiddynamik

KfK 5222

**Elektrische Schaltung zur Simulation des Temperaturverhaltens einer Heizstrecke für den
Einsatz in einem Simulationsprogramm**

W.Rapp

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

ISSN 0303-4003

Für den Einsatz in einem analogen elektrischen Schaltungssimulationssystem wurde eine Schaltung entwickelt, welche das Temperaturverhalten eines Objektes als Funktion der zugeführten Heiz- oder Kühlleistung simuliert. Es wurde versucht, diese Schaltung auf anschauliche Weise, ohne die Methoden der konventionellen Regelungstechnik, zu konstruieren. Der Vergleich zwischen dem gemessenen Temperaturverlauf eines beheizten Objektes mit dem Verlauf der Ausgangsfunktion der elektrischen Simulationsschaltung zeigt eine gute Übereinstimmung der Kurveneigenschaften. Die Schaltung ist mit dem "Electronic Circuit Analysis Program" MICRO-CapIV der Firma Spectrum realisiert und eingesetzt worden. Das Ziel ist die Untersuchung und Optimierung verschiedener Regelungssysteme.

Electronic circuit for use in an analog circuit analysis program for the simulation of the temperature behaviour of a heating section

A circuit simulating the temperature behavior of an object as a function of the heating or cooling energy supplied has been developed for use in an analog electronic circuit analysis system. It was attempted to design this circuit in a descriptive manner without applying the methods of conventional control engineering. As is evident from the comparison of the measured temperature behavior of a heated object and the initial function of the electronic simulation circuit, the curve properties are in good agreement. The circuit has been developed and applied within the framework of the "Electronic Circuit Analysis Program" MICRO-CapIV of the Spectrum company with the objective of investigating and optimizing various control systems.

I

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Zusammenfassung	1
2. Zusammenhang zwischen einem wärmetechnischen Modell und einer elektrischen Schaltung	2
2.1 Wärmetechnisches Modell eines elektrisch beheizten Objekts	2
2.2 Elektrische Simulationsschaltung	3
2.2.1 Simulation eines Wärmespeichers (WK)	4
2.2.2 Simulation des Wärmeaustausches zwischen zwei WK's	6
2.2.3 Simulation des Wärmeaustausches an die Umgebung oder an den Prozeß	8
2.2.4 Mathematisch formulierte Wärmeaustauschmechanismen	9
2.2.5 Elektrische Simulationsschaltung mit 3 Integratoren	9
3. Bestimmung der elektrischen Schaltungselemente	11
3.1 Normierung der Regelgrößen	11
3.2. Zeitkonstante des Systems τ_s	11
3.2.1 "Innere Zeitkonstanten" τ_{ij}	11
3.2.2 Zeitkonstanten der Austauschelemente τ_{ai}	14
3.3. Eingangswiderstand	14
3.4. Verhältnis von Widerstands- und Kondensatorenwerten	14
3.5. Widerstandswerte für Wärmeverluste an die Umgebung oder an den Prozeß	14
4. Beispiel einer Simulation eines beheizten Objekts mit zwei Wärmespeicher	14
4.1. Ermittlung der Wärmekapazitäten einer Anordnung aus Kochplatte und Messingzylinder	14
4.2 Normierung der Regelgrößen	16
4.3 Festlegung der Kondensatoren - und Widerstandswerte der Simulationsschaltung	16
4.3.1 Graphische Bestimmung der "inneren Zeitkonstante" und der Wärmeverlustzeitkonstante einer Anordnung mit zwei WK's.	17
4.3.2 Überblick über die verschiedenen Zeitkonstanten der Heizstrecke	20
5. Das "Electronic Circuit Analysis Programm"	21
5.1 Verhalten der Simulationsschaltung im Simulationsprogramm	21
5.2. Schaltungsparameter	21
5.3. "Stepping" von Schaltungsparametern	22
5.4 Simulation einer mathematischen Formel	25
6. Verhalten der Simulationsschaltung im Regelkreis	26
6.1 Optimierung des Regelungsverhalten durch "Stepping" des K-Faktors und der Integrationszeitkonstante	27
7. Schlußbemerkung	29

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Vereinfachtes Modell eines beheizten Objekts
- Abb. 2 Blockschaltbild der elektrischen Ersatzschaltung des wärmetechnischen Modells
- Abb. 3 Elektrischer Integrator
- Abb. 4 Elektrische Simulationsschaltung
- Abb. 5 Simulationsschaltung eines Wärmeaustauschelements
- Abb. 6 Gesamtschaltung einer simulierten Heiz- oder Kühleinrichtung mit drei Wärmekapazitäten und drei Wärmeaustauschelementen
- Abb. 7 Kondensatorschaltung von zwei Integratoren mit Ausgleichswiderstand
- Abb. 8 "Schaltbild zweier WK's mit "Heatpipe"
- Abb. 9 Zeichnerische Bestimmung der Zeitkonstante einer e-Funktion
- Abb. 10 Temperatenausgleichsvorgang der Kochplatten - Messingzylinder - Anordnung.
x-Achse: 1min/Div. y-Achse: 1k/Div.
- Abb. 10a Zeichnerische Bestimmung der Zeitkonstante τ_i aus Abb. 10
- Abb. 11 Verlauf der Abkühlkurven der gesamten Anordnung x-Achse: 4min/Div.
- Abb. 12 Verlauf der Spannungen an den Integratoren 2 und 3 nach einer Einschaltdauer der maximalen Leistung von 10 Sekunden.
- Abb. 13 Stepping von R_{i1}
- Abb. 14 Stepping von R_{i2}
- Abb. 15 Stepping von R_{a1} ;
- Abb. 16 Stepping von R_{a2}
- Abb. 17 Stepping von R_{a3}
- Abb. 18 Regelkreis mit Simulationsschaltung als "Macro" "Ofen"
- Abb. 19 Temperaturverläufe einer Simulationsschaltung mit 5 WK's
- Abb. 20 Optimierung der Regelung durch "Stepping" des K-Faktors (R3 Abb.18)
- Abb. 21 Weitere Optimierung durch Ausschnittvergrößerung
- Abb. 22 Optimierung durch "Stepping" der Integrationszeitkonstante (C_1 Abb.18)

1. Zusammenfassung

Für die optimale Gestaltung eines elektrischen Regelkreises ist das Zeitverhalten des zu regelnden Parameters eines Objektes in Abhängigkeit von der Stellgröße von entscheidender Bedeutung. Zur Untersuchung des Regelverhaltens von verschiedenen Regelungssystemen mit Hilfe der heute verfügbaren elektronischen Schaltungsanalyseprogramme, muß für dieses Zeitverhalten, eine elektrische Ersatzschaltung gefunden werden. Diese Schaltung muß in ihrem Übertragungsverhalten möglichst genau dem Verhältnis von Stellwert zu Istwert entsprechen.

Für die Entwicklung einer elektrischen Schaltung zur Simulation einer Heizstrecke wurde ein Weg außerhalb der konventionellen Methoden der Regelungstechnik gewählt. Für die wärmetechnischen Ausgleichsvorgänge wurden Schaltungsteile gefunden und entsprechend dem Verständnis der physikalischen Gegebenheiten für den Fall einer einfachen Heizstrecke zusammengefügt.

Zum besseren Verständnis werden die für die Simulation benutzten Schaltungselemente am Beispiel zweier Wärmekapazitäten mit einer Wärmebrücke mit vernachlässigbarer Wärmekapazität, einer sogenannten "Heatpipe", erläutert. Die Simulationsschaltung für den Wärmeaustausch an die Umgebung oder an den Prozeß wird anschließend hinzugefügt. Die endgültig dargestellte Schaltung enthält die Simulation von drei Wärmekapazitäten, zwei "Heatpipes" und drei Wärmeaustauschelementen. Für die Dimensionierung der Schaltelemente wurden die wärmetechnischen Parameter in adäquate elektrische Größen umgewandelt. Es wurden die Temperaturkurve einer kurzzeitig beheizten Kochplatte mit Messingklotz mit dem Ausgangssignal der kurzzeitig erregten elektrischen Simulationsschaltung verglichen. Die Übereinstimmung im charakteristischen Kurvenverlauf entspricht den Erwartungen.

Die Schaltung wurde als Heizstrecke in eine PI- Regelschleife eingefügt und das Einschwingverhalten der Temperatur, mit der Integrationszeitkonstante und dem K-Faktor des Reglers als Parameter, optimiert.

2. Zusammenhang zwischen einem wärmetechnischen Modell und einer elektrischen Schaltung

2.1 Wärmetechnisches Modell einer Heizstrecke

Eine Heizstrecke (Regelstrecke) wird in Wärmekapazitäten (WK's) aufgeteilt, die untereinander durch Wärmebrücken mit vernachlässigbarer Masse (sogenannte "Heatpipes") verbunden sind und der Wärmetransport durch Wärmeleitung geschieht. Für die einzelnen WK's werden mittlere Temperaturen angenommen, eine bei der hier betrachteten geringen Anzahl von definierten Wärmekapazitäten stark vereinfachte Näherung. Für das Verständnis jedoch ist dieses Modell ausreichend, und läßt sich später für eine genauere Simulation beliebig kaskadieren. Allgemein gilt, daß die Differenz der zugeführten und der abgegebenen Energien im System gespeichert ist (Energieerhaltungssatz). Im folgenden wird angenommen, daß die Heizstrecke elektrisch beheizt wird und nicht verlustfrei ist, und somit ein Teil der Energie mit der Umgebung ausgetauscht wird. Abb. 1 zeigt das Blockschaltbild dieses Modells.

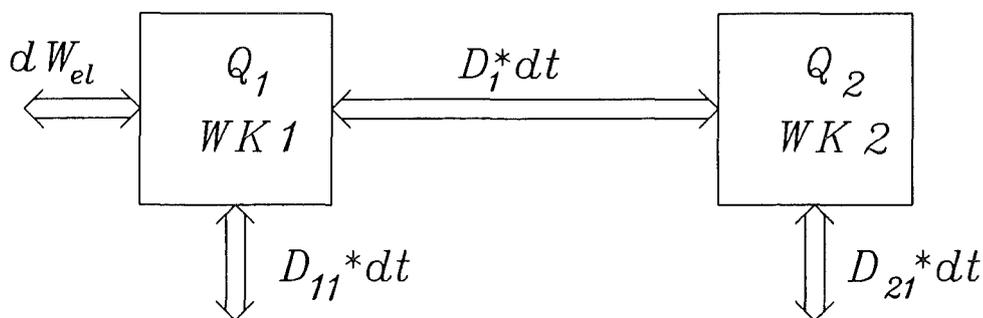


Abb. 1 Vereinfachtes Modell einer Heizstrecke

WK = Wärmekapazität

D = Wärmestrom (Dim=Leistung)

W_{el} = elektrische Energie

Q = gespeicherte Wärmemenge

D_{12} = Wärmestrom zwischen WK₁ und WK₂
 D_{11} = Wärmestrom zwischen WK₁ und Umgebung
 D_{21} = Wärmestrom zwischen WK₂ und Umgebung

Für die zugeführte elektrische Energie W gilt:

$$W = \int u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (1)$$

Hierin bedeutet $u(t)$ die an der Heizung momentan anliegende elektrische Spannung und $i(t)$ der zugehörige elektrische Strom.

Für den Wärmestrom D in einem sich zeitlich veränderndem Temperaturgefälle $T_2(t) - T_1(t)$ gilt mit:

λ = Wärmeleitzahl; F = Fläche; δ = Dicke der Wärmeleitschicht;
 V = Volumen; c_w = spez. Wärmekapazität; R_l = Wärmeleitwiderstand; /1/

$$D = \frac{\lambda \cdot F}{\delta} (T_2(t) - T_1(t)) = \frac{1}{R_l} (T_2(t) - T_1(t)) \quad (2)$$

Für die durch Wärmeleitung transportierte Wärmeenergie gilt dann:

$$Q_r = \int D \, dt = \int \frac{1}{R_l} \cdot (T_2(t) - T_1(t)) \cdot dt \quad (2a)$$

Für die in einem Volumen gespeicherte Wärmemenge bzw. Energie gilt:

$$Q_s = V \cdot c_w \cdot (T_2 - T_1) \quad (3)$$

2.2 Elektrische Simulationsschaltung

Für das hier abgeleitete Modell der Heizstrecke soll nun eine elektrische Simulationsschaltung angegeben werden, die das Zeitverhalten der tatsächlichen Heizstrecke besitzt. In der Simulationsschaltung entspricht der elektrische Strom dem Wärmestrom und die Wärmekapazität einem Integrationsglied. Hiermit erhält man das in Abb. 2 dargestellte elektrische Blockschaftbild für das Heizstreckenmodell.

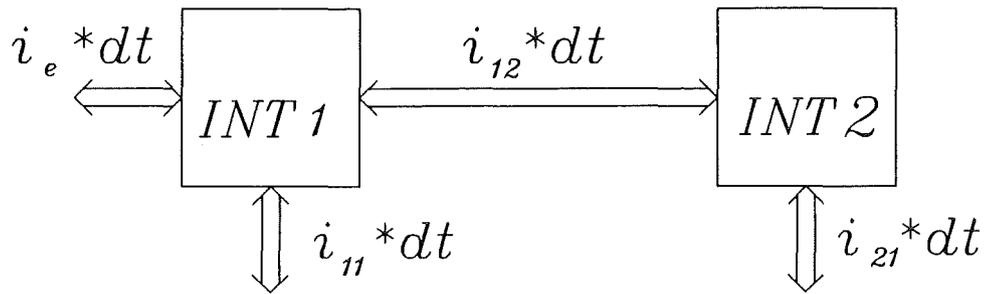


Abb. 2 Blockschaltbild der elektrischen Ersatzschaltung des wärmetechnischen Modells

INT = elektrischer Integrator

2.2.1 Simulation eines Wärmespeichers (WK)

Mit einem aktiven elektrischen Integrator lässt sich ein verlustfreier Wärmespeicher simulieren bei dem der Eingangsstrom proportional der Heiz- oder Kühlleistung ist. Da ein aktiver elektr. Integrator nur über den invertierenden Eingang eines Operationsverstärkers realisiert werden kann (Bild 2), ist die Ausgangsspannung bei zugeführter Energie negativ.

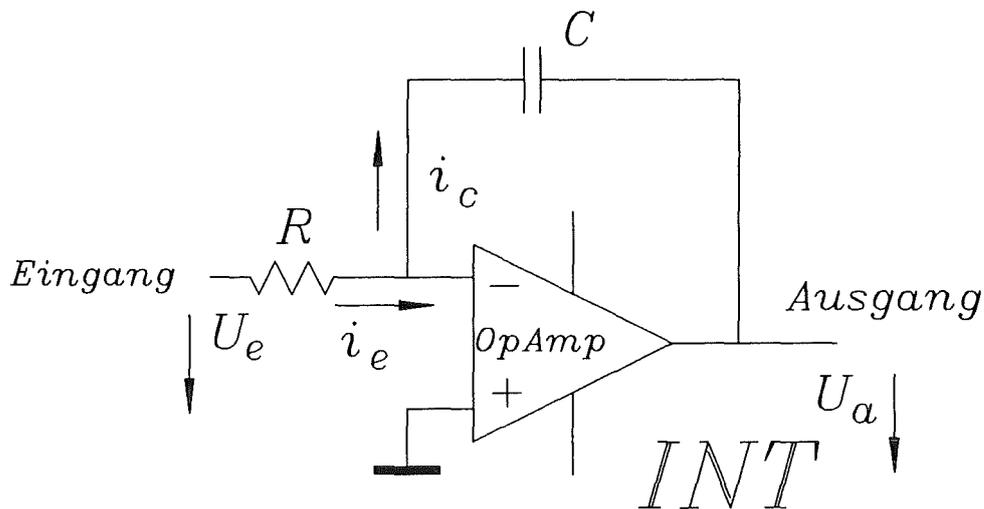


Abb. 3 Elektrischer Integrator

Für den verlustfreien Integrator gelten folgende Beziehungen:

$$i_e = i_c = \frac{u_e}{R} \quad (4)$$

$$u_a(t) = \frac{Q(t)}{C} = \frac{\int i_c(t) \cdot dt}{C} \quad (5)$$

mit $i_c = \text{const.}$ gilt:

$$i_c = \frac{u_a(t) \cdot C}{t} \quad (6)$$

aus (4) und (5a) folgt

$$\frac{u_e}{R} = \frac{u_a \cdot C}{t} \Rightarrow \frac{u_a}{u_e} = \frac{t}{R \cdot C} \quad (7)$$

d.h. bei konstanter Eingangsspannung U_e steigt die Ausgangsspannung $-U_a$ des Integrators mit der Zeit t linear an und erreicht nach der Zeit $RC=t$ den Wert der Eingangsspannung.

-Für eine elektrisch beheizte Wärmekapazität WK gilt, daß die zugeführte elektrische Energie W gleich der daraus resultierenden thermisch gespeicherten Energie Q ist.

$$W = U \cdot I \cdot t = Q = m \cdot c_w \cdot (T_2 - T_1) \quad (8)$$

m =Gewicht der WK; c_w =spez. Wärmekapazität; $(T_2 - T_1)$ = mit der Energiezufuhr erreichte Temperaturerhöhung

Soll die von einer Wärmekapazität aufgenommene Leistung durch den Eingangsstrom eines elektrischen Integrators simuliert werden, so muß gelten:

$$\int i_e \cdot dt = C \cdot u_a = f' \cdot \int P \cdot dt = f' \cdot V \cdot c_w \cdot (T_2 - T_1) \quad (9)$$

f' = Normierungskonstante

Aus Gleichung (8) folgt:

$$V \cdot c_w \equiv C \quad (10)$$

und

$$T_2 - T_1 \equiv u_a \quad (11)$$

Die Zeitkonstante einer WK wird, analog den Verhältnissen beim elektrischen Integrator, durch den Quotienten aus der maximal in ihr zu speichernden Energie und der maximal zur Verfügung stehenden Leistung definiert.

$$t_g = \frac{m \cdot c_w \cdot (T_2 - T_1)_{\max}}{(U \cdot I)_{\max}} = R \cdot C \quad (12)$$

Die WK erreicht nun, wie der elektrische Integrator (7) seine Spannung, nach der Einschaltzeit t_g seine maximale Temperatur. Unter diesen Bedingungen läßt sich eine WK durch einen elektrischen Integrator mit gleicher Zeitkonstante simulieren. Zu beachten ist, daß der Strom des Integrators der Leistung bei der simulierten WK entspricht.

2.2.2 Simulation des Wärmeaustausches zwischen zwei WK's

Das Gesetz für den Wärmestrom gilt neben der ursprünglichen Definition /1/ insbesondere auch für das wärmetechnische Modell in Abb. 1 . Der Wärmestrom in der "Heatpipe" ist direkt proportional der Temperaturdifferenz der beiden WK's und umgekehrt proportional dem Wärmeleitwiderstand R_1 (14). Der elektrische Strom i in der Simulationsschaltung entspricht anschaulich dem Wärmestrom, der aber, im Gegensatz zum elektrischen Strom, die Dimension einer Leistung hat. In der Schaltung in Abb.4 wird die Differenz der beiden Ausgangsspannungen der Integratoren über die Widerstände R invertiert dem INT 1 und

nichtinvertiert dem INT 2 zugeführt. Es fließt so entsprechend der Differenz der Ausgangsspannungen der Integratoren ein gleich großer Lade - bzw. Entladestrom. Simuliert der elektrische Strom den Wärmestrom, so muß dieser wie schon in (8) mit der gleichen Normierungskonstante f' mit dem Wärmestrom verknüpft werden.

$$i_e = f' \cdot D(t) = f' \cdot \frac{\lambda \cdot F}{\delta} [T_2(t) - T_1(t)] \quad (13)$$

Die zwischen INT1 und INT2 ausgetauschte elektrische Ladung simuliert die zwischen WK1 und WK2 transportierte Wärmemenge bzw. Energie.

$$\text{Mit } R_i = \frac{\delta}{\lambda \cdot F} \quad R_i = \text{Wärmeleitwiderstand} \quad (14)$$

gilt für die transportierte Wärmemenge Q_T der Zusammenhang:

$$\int i_e \cdot dt = f' \cdot \int D \cdot dt = \frac{1}{R_i} \cdot f' \cdot \int (T_2(t) - T_1(t)) \cdot dt \quad (15)$$

Die Werte der Bauelemente und der elektrischen Größen in dieser Schaltung werden in Abschnitt 3 erläutert. Der Eingangsstrom wird durch den Widerstand R_e festgelegt. Die Widerstände R bestimmen zusammen mit den Kapazitäten das Zeitverhalten das den Temperatenausgleichsvorgang zwischen den WK's simuliert. Dieses Zeitverhalten kann als eine "innere Zeitkonstante" des Systems aufgefaßt werden.

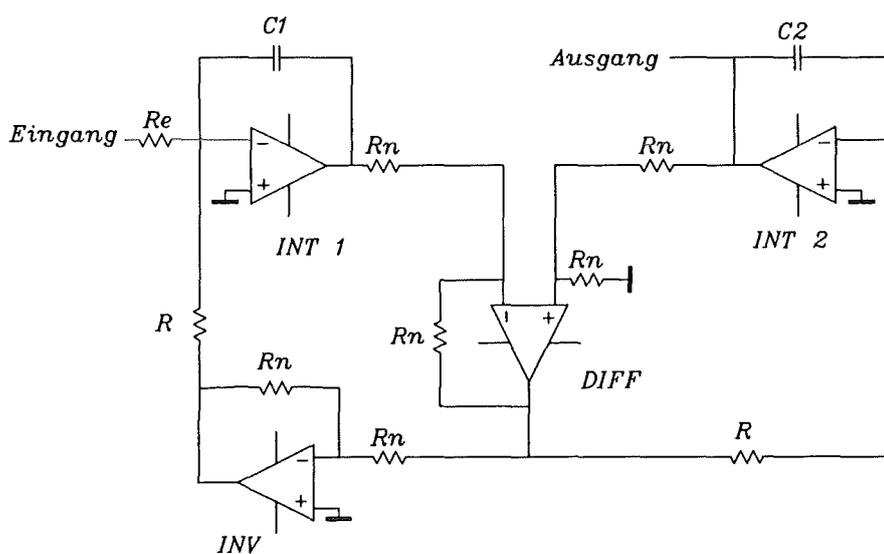


Abb. 4 Elektrische Simulationsschaltung

2.2.3 Simulation des Wärmeaustausches an die Umgebung oder an den Prozeß

Während beim Übergang der Wärmeenergie durch Wärmeleitung von einer WK auf die Benachbarte sich beide Temperaturen entsprechend der Speicherfähigkeit der einzelnen WK's ändern, ist die Bezugstemperatur in diesem Fall von außen vorgegeben. Für den Wärmestrom gilt damit:

$$D(t) = \frac{1}{R_l} (T_{WK}(t) - T_0) \quad (16)$$

T_{WK} = Temperatur der WK

T_0 = Temp. der Umgebung oder des Prozesses

Für den simulierenden Strom gilt :

$$i(t) = \frac{1}{R} (U_{aWK}(t) - U_0) = f' \cdot D(t) \quad (17)$$

U_{aWK} = Ausgangsspannung des Integrators der simul. WK

U_0 = Sim. Spg. der Umgebungs - oder Prozeßtemperatur

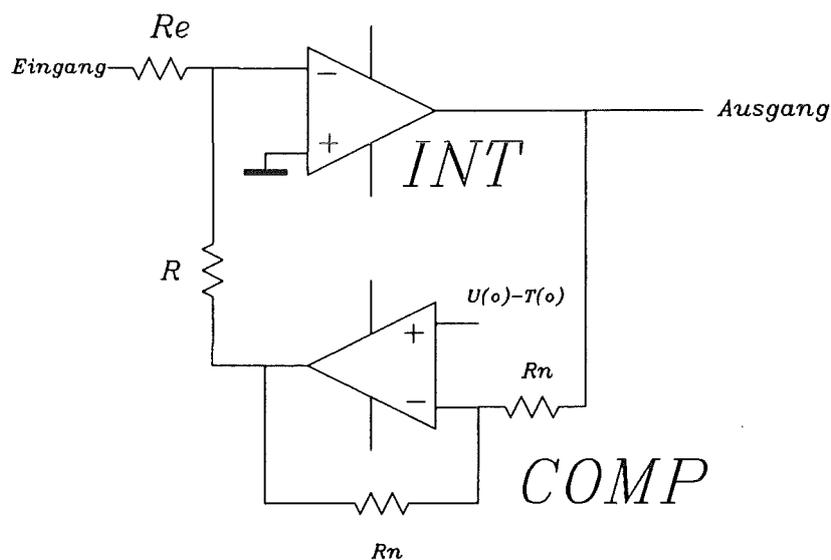


Abb. 5 Simulationsschaltung eines Wärmeaustauschelements

Das Schaltungselement besteht aus einem Differenzverstärker mit der Verstärkung eins für die Ermittlung der Differenz zwischen der Ausgangsspannung des Integrators für die Simulation der WK und der Simulationsspannung für die Umgebungs - bzw. der Prozeßtemperatur. Der Ausgang des als COMP in Abb. 5 bezeichneten Differenzverstärkers ist durch den Widerstand R mit dem Eingang des Integrators verbunden. Er ist proportional dem entsprechenden Wärmeleitwiderstand. Die elektrische Zeitkonstante muß auch hier mit der wärmetechnischen Zeitkonstante übereinstimmen.

2.2.4 Mathematisch formulierte Wärmeaustauschmechanismen

Die Simulation von mathematisch formulierten Wärmeaustauschmechanismen ist wenig anschaulich, und ist eine spezielle Eigenschaft des verwendeten Simulationsprogrammes. Diese Möglichkeit wird daher erst in einem Beispiel für den Wärmeaustausch durch Strahlung in Abschnitt 5.4 kurz aufgezeigt wird, aber im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet.

2.2.5 Elektrische Simulationsschaltung mit 3 Integratoren

In der vorgestellten Schaltung (Abb. 6) wird die zu- oder abgeführte elektrische Energie durch den Integrator INT 1, gebildet durch IC1, und C1, gespeichert. Dieser Integrator simuliert die erste Wärmekapazität (WK1). Dies kann z.B. eine Heizpatrone oder eine Kühlschlange sein. Der Integrator 2, gebildet aus IC2 und C2, simuliert z.B. ein Verbindungselement (WK2), und Integrator 3, gebildet aus IC7 und C3, den Rezipienten (WK3). Der Wärmetransport zwischen WK1 und WK2 wird durch den Differenzverstärker IC3, den Inverter IC4 und den beiden Widerstände R_{j1} simuliert. Der Wärmeübergang von WK2 auf WK3 wird durch den Differenzverstärker IC8, den Inverter IC9 und die beiden Widerstände R_{j2} simuliert. Die Simulation des Wärmeaustausches mit der Umgebung oder dem Prozeß geschieht für die WK1 durch IC5 und R_{a1} , für die WK2 durch IC6 und R_{a2} und für die WK3 durch IC10 und R_{a3} . Verschiedene Umgebungs - oder Prozeßtemperaturen führen zu verschiedenen Referenzspannungen an den IC's 5,6 und 10. Das der Temperatur proportionale Ausgangssignal der gesamten Anordnung liefert IC7. 0 Volt Ausgangsspannung bedeutet, daß sich das zu simulierende Objekt auf Umgebungstemperatur befindet.

Für eine genauere Simulation der nichtstationären Wärmeströmung /1/ können diese Schaltungsteile beliebig kaskadiert werden.

Es ist auch eine direkte Kopplung aller beteiligten Integratoren möglich. Dazu sind jeweils ein Differenzverstärker zur Ermittlung der Differenztemperatur zwischen den beteiligten WK's, ein Invertierer und zwei gleich große Widerstände zum Ladungsaustausch notwendig.

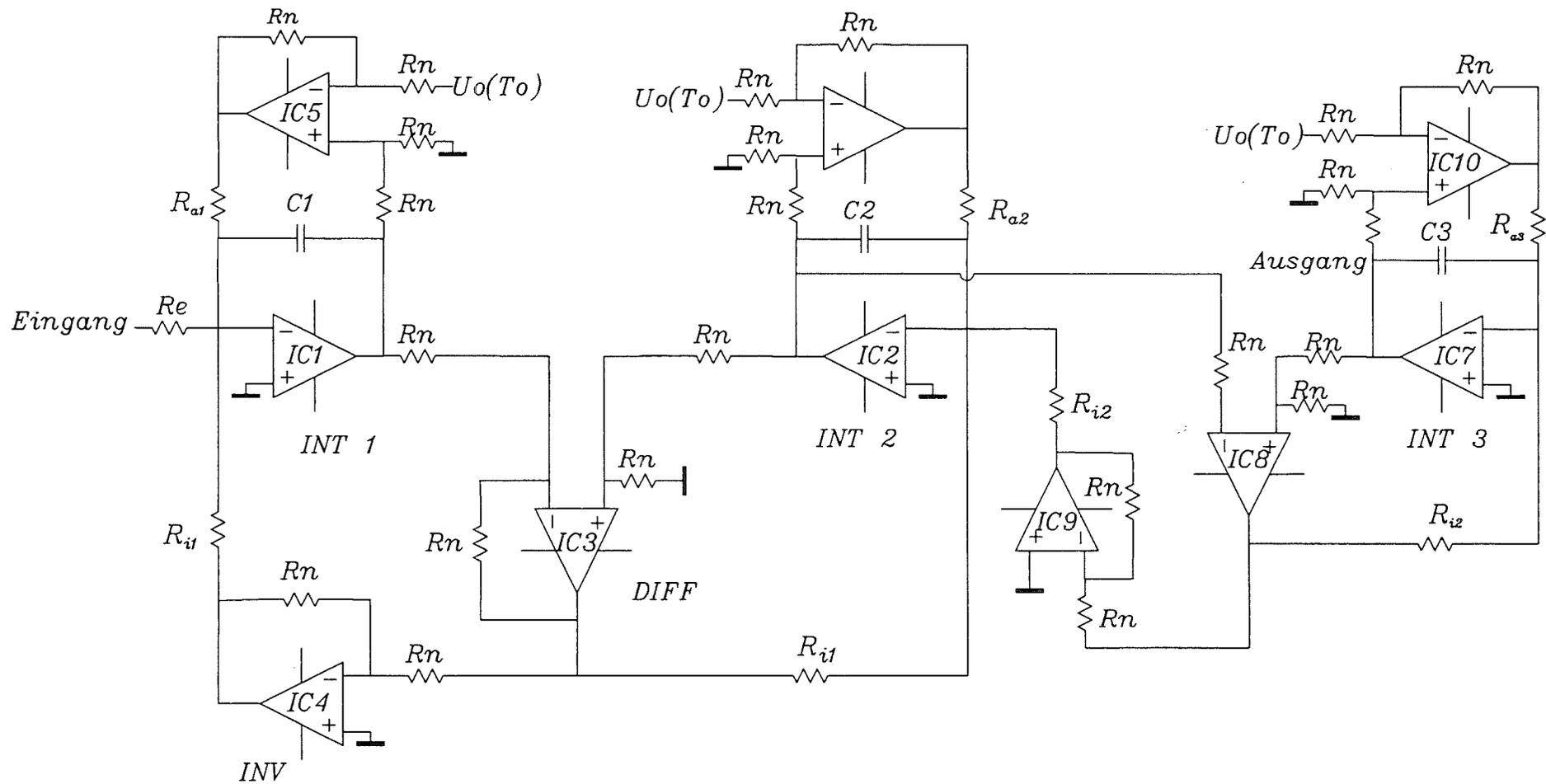


Abb. 6 Gesamtschaltung einer simulierten Heiz- oder Kühleinrichtung mit 3 Wärmekapazitäten und 3 Wärmeaustauschelementen

3. Bestimmung der elektrischen Schaltungselemente

Zuerst wird versucht die Gesamtspeicherfähigkeit der wärmetechnischen Anordnung zu berechnen, oder durch Messung oder Abschätzung zu ermitteln. Danach wird die Speicherfähigkeit und der Eingangswiderstand der elektrischen Schaltung festgelegt und daraus die Konstante f berechnet. Die Wahl der Anzahl der Integratoren und die Aufteilung der Gesamtkapazität auf diese geschieht unter Berücksichtigung der physikalischen Verhältnisse in der wärmetechnischen Anordnung. Ebenso ist zu entscheiden, mit welchen dieser Integratoren ein Wärmeaustausch mit der Umgebung simuliert werden soll. Der schwierigste Teil der Aufgabe ist die Festlegung der einzelnen Zeitkonstanten. Für die Bestimmung der elektrischen Schaltungskomponenten werden im folgenden keine exakte Berechnungsverfahren angegeben. Die aufgezeigten Zusammenhänge erlauben aber eine zufriedenstellende Dimensionierung der Schaltung.

3.1 Normierung der Regelgrößen

Aus der Abweichung zwischen Soll- und Istwert eines Regelkreises wird, nach besonderen Regeln, der Stellwert gebildet.

Dabei werden diese Werte im allgemeinen auf den Bereich von 0 bis 100% normiert. Ist z.B. die Istwertspannung eines Thermoelements bei einer maximalen Prozeßtemperatur von 1000°C ca. 40mV (100% - Wert), so bedeutet dies für den praktischen Einsatz, daß diese 40mV für den Regler durch Verstärkung auf dessen 100% Pegel gebracht werden. Es sind dies in der Regel 10V oder 20mA.

Dies gilt sinngemäß ebenso für den Soll- und den Stellwert. Eine andere Vorgehensweise würde zu Genauigkeitsverlusten wegen dem begrenzten elektronischen Auflösungsvermögen der Ein- und Ausgänge führen.

Für die Simulationsschaltung ist es ebenfalls sinnvoll, diese 100% Werte zu ermitteln und zu verwenden.

3.2. Zeitkonstante des Systems τ_s

In der Praxis kann der Wärmeinhalt einer Anordnung durch Zuführen einer definierten elektrischen Energie über den resultierenden Temperaturanstieg ermittelt werden. Die Aufteilung auf die WK's der verschiedenen Konstruktionselemente kann abgeschätzt oder durch detailliertere Temperaturmessungen präzisiert werden. Die so ermittelte gesamte Wärmekapazität des Systems ergibt mit Gleichung (7) die Zeit die notwendig ist, um mit der verfügbaren Maximalleistung das System auf die maximale Temperatur (100% - Wert) zu erwärmen. Für die Simulationsschaltung gilt deshalb, daß die Summe der darin enthaltenen Integrationskapazitäten, bei 100% Eingangsspannung über den Widerstand R_e in der gleichen Zeit auf 100% Ausgangsspannung gebracht wird. Eine Rechenbeispiel folgt in Abschnitt 4. Üblicherweise ergibt das Produkt aus einem Widerstand (R_e) und einer Kapazität (ΣC_j) eine Zeitkonstante die hier als Zeitkonstante τ_s des Systems bezeichnet werden soll.

3.2.1 "Innere Zeitkonstanten" τ_{ij}

Die elektrische Zeitkonstante des Ladungsaustausches zwischen den Integratoren muß gleich der wärmetechnischen Zeitkonstante für den Energieausgleich zwischen den WK's.

sein (6,11). Da die Kondensatoren, zumindest in ihrer Summe bereits durch 3.2. festgelegt sind, kann der Zeitverlauf des Ladungsaustausches zwischen den Integratoren nur noch durch die Größe der Widerstände R_{ij} beeinflusst werden. Die dadurch gewählten Zeitkonstanten sollen als "innere Zeitkonstanten" τ_{ij} bezeichnet werden. Der Ladungsausgleich zwischen zwei Integratoren ohne äußeren Einfluß läßt sich durch die Schaltung Abb. 7 darstellen.

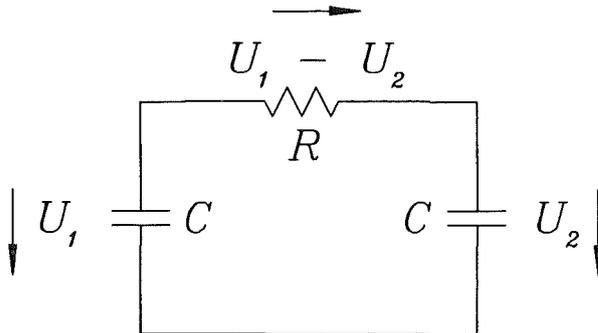


Abb. 7 Kondensatorschaltung von zwei Integratoren mit Ausgleichswiderstand

Für den Ladungsausgleich in Abb. 7 gilt

$$\sum u_i = 0 \quad (18)$$

$$u_1 + i(t) \cdot R + u_2 = 0 \quad (19)$$

$$\frac{1}{c_1} \int i(t) \cdot dt + i(t) \cdot R + \frac{1}{c_2} \int i(t) \cdot dt = 0 \quad (20)$$

Mit einer Lösung vom Typ:

$$i(t) = I_0 \cdot e^{-at} \quad (21)$$

mit

$$a = \frac{1}{R} \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right) = \frac{1}{\tau_i} \quad (22)$$

und

$$I_0 = \frac{U_1 - U_2}{R} \quad (23)$$

Der Wärmeausgleich zwischen zwei WK's ohne äußeren Einfluß läßt sich durch Abb. 8 darstellen.

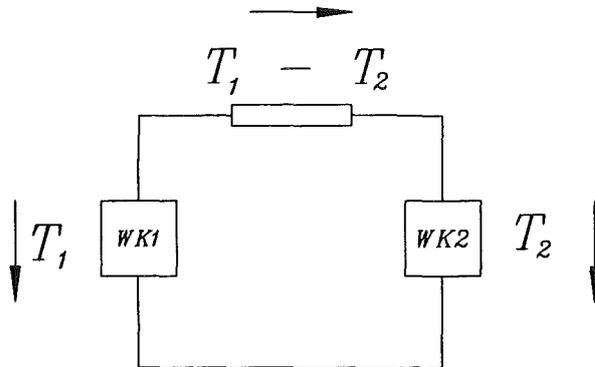


Abb. 8 Schaltbild zweier WK's mit "Heatpipe"

Durch Anlehnung an das Ohmsche Gesetzes gilt für den Energietransport in Abb. 8

$$\sum T_i = 0 \quad (24)$$

$$T_1 + D(t) \cdot R_t + T_2 = 0 \quad (25)$$

$$\frac{1}{m_1 \cdot c_{w1}} \int D(t) \cdot dt + D(t) \cdot R_t + \frac{1}{m_2 \cdot c_{w2}} \int D(t) \cdot dt = 0 \quad (26)$$

mit einer Lösung vom Typ:

$$D(t) = D_0 \cdot e^{-bt} \quad (27)$$

mit

$$b = \frac{1}{R_t} \left(\frac{1}{m_1 \cdot c_{w1}} + \frac{1}{m_2 \cdot c_{w2}} \right) = \frac{1}{\tau_i} \quad (28)$$

und

$$D_0 = \frac{T_1 - T_2}{R_t} \quad (29)$$

Der Vergleich zeigt, daß das Zeitverhalten des Wärmestroms, bei einem wärmetechnischen System, nach unterbrochener Energiezufuhr, dem Zeitverhalten des Stromes in der Simulationsschaltung gleicht.

Der Wärmestrom, und damit auch die Temperaturverläufe der WK's folgen e - Funktionen.

Die "innere Zeitkonstante" $R_{ij} C_i$ kann somit durch Auswertung des Temperaturverlaufs nach Abschalten der Energiezufuhr ermittelt werden. Für die meisten Fälle reicht aber auch hier eine Abschätzung.

3.2.2 Zeitkonstanten der Austauschelemente τ_{ai}

Auch hier wird das Zeitverhalten wie schon in 3.2.1 nur durch die Größe der Widerstände R_{ai} bestimmt. Die Zeitverläufe dieser Austauschvorgänge werden durch die Zeitkonstanten τ_{ai} charakterisiert. Auf die Ausführung eines Beispiels wird hier verzichtet. Der Zeitverlauf ist vom gleichen Typ wie in 3.2.1.

3.3. Eingangswiderstand

Der Eingangswiderstand der Schaltung wird so gewählt, daß der 100% ige Stellwert die gleiche Einschaltdauer braucht um alle Integratoren auf 10V zu laden, wie die Maximalleistung der Heizung braucht, um die gesamte Konstruktion auf maximale Temperatur zu erwärmen (wie in 3.2); wohlgemerkt ohne Wärmeverluste. Die Zeit für den Temperaturengleich im gesamten System ist, bedingt durch die "inneren Zeitkonstanten" des Systems, üblicherweise sehr viel länger.

3.4. Verhältnis von Widerstands- und Kondensatorenwerten

Für das Zeitverhalten ist das Verhältnis von C zu R bei gleichem Produkt $R \cdot C$ gleichgültig.

3.5. Widerstandswerte für Wärmeverluste an die Umgebung oder an den Prozeß

Der Widerstandswert für den Wärmeverlust an eine Temperatursenke mit konstanter Temperatur, wird durch einen negativen Integratorstrom über einen Widerstand eingestellt. Die Größenordnung der Zeitkonstante kann experimentell ermittelt werden. Bei gegebener Kapazität des Integrators kann so der Widerstandswert ermittelt werden.

Die Summe der Simulationen der Wärmeaustauschelemente muß die gleiche elektrische Zeitkonstante wie das wärmetechnische Objekt im Austausch mit der Umgebung oder dem Prozeß haben.

4. Beispiel einer Simulation eines beheizten Objekts mit zwei Wärmespeicher

4.1. Ermittlung der Wärmekapazitäten einer Anordnung aus Kochplatte und Messingzylinder

WK1:Kochplatte

WK2:Messingzylinder

$T_{max}=125^{\circ}C$

$$T_0 = 25^\circ\text{C}$$

Die spezifische Wärmekapazität der WK1 wird der Einfachheit halber durch zeitlich begrenztes Aufheizen bestimmt. Eine Leistungszufuhr von ca. 1.7kW für 5s führte zu einer Temperaturerhöhung von 6.4K. Mit Gleichung (7) folgt daraus:

$$V \cdot c_w = \frac{U \cdot I \cdot t}{\Delta T} = \frac{230 \cdot 7.37 \cdot 5 \cdot \text{VA} \cdot \text{s}}{6.4 \text{K}} = 1.325 \text{kJ} / \text{K} \quad (30)$$

Die Temperaturänderung von 6.4K stellt sich immerhin erst nach ca. 180s ein. Während dieser Zeit muß jedoch mit einem Wärmeverlust gerechnet werden. Die tatsächliche Temperaturänderung wäre demnach höher und damit die Wärmekapazität der WK1 kleiner. Dieser Umstand wird durch eine Verminderung der spezifischen Wärmekapazität der WK1 um ca. 10% auf 1.2kJ/K berücksichtigt.

Die zur Aufwärmung der WK1 auf den Sollwert von 125°C benötigte Energie ist:

$$Q_1 = 100\text{K} \cdot 1.2 \text{kJ/K} = 120 \text{kJ} \quad (31)$$

Die Spezifische Wärmekapazität der WK2 ist mit $c_w = 380 \text{J/kgK} / 3$:

$$V \cdot c_w = \frac{1.37 \cdot \text{kg} \cdot 380 \text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (32)$$

Die zur Aufwärmung der WK2 auf den Sollwert von 125°C benötigte Energie ist:

$$Q_2 = 100\text{K} \cdot 1.37 \text{kg} \cdot 0.38 \text{kJ/K} = 52 \text{kJ} \quad (33)$$

$$Q_{\text{ges.}} = Q_1 + Q_2 = 172 \text{kJ} \quad (34)$$

Die notwendige Energie für das Aufheizen der Konstruktion auf Tmax beträgt somit

$$Q = 172 \text{kJ} \cdot \text{J} = 172 \text{kWs} \quad (35)$$

Mit (12) errechnet sich für eine maximale Heizleistung von 1.7kW die Zeit

$t_g = \text{Notwendige Energie} / \text{maximale Leistung} = \text{Heizdauer}$

$$t_g = \frac{172 \text{kWs}}{1.7 \text{kW}} \cong 100 \text{s} \quad (36)$$

Die Einschaltdauer (ohne Wärmeverluste) der maximalen elektrischen Leistung beträgt demnach 100sec um die Konstruktion von 25°C auf 125°C zu erwärmen.

4.2 Normierung der Regelgrößen

Der 100% - Wert der Stellgröße ist 1.7kW, der 0% Wert 0kW. Der 100% Wert des Istwertes beträgt 125°C, der 0% Wert ist 25°C. Der 100% Wert in der Simulationsschaltung ist 10 Volt, der 0% Wert 0Volt.

4.3 Festlegung der Kondensatoren - und Widerstandswerte der Simulationsschaltung

Die Einschaltdauer (ohne Wärmeverluste), der maximal verfügbaren elektrischen Energie, beträgt demnach 100s, um die Konstruktion von 25°C auf 125°C zu erwärmen.

Legt man nun willkürlich den Eingangswiderstand R_e der Simulationsschaltung auf 1Megohm fest, so ergibt sich für die Summe aller Schaltungskapazitäten der Wert von $100\mu F$. Bei einer Simulationsschaltung mit zwei Integratoren würde sich diese nach der Rechnung oben in einer Kapazität von ca. $77\mu F$ für C_1 des ersten Integrators und einer Kapazität von ca. $23\mu F$ für C_2 des zweiten Integrators aufteilen.

Die Aufteilung auf die einzelnen Integratoren kann bei Verwendung einer Simulation mit mehreren Integratoren abgeschätzt, oder durch Temperaturmessungen an verschiedenen Konstruktionsteilen ermittelt werden. Nach 3.2.1 folgen die Temperaturverläufe der Aufheiz- und der Abkühlphase einer WK einer e-Funktion, und es können daraus die "innere Zeitkonstante" τ_i und die Abkühlzeitkonstante τ_a zeichnerisch ermittelt werden.

Legt man durch den Punkt der größten Steigung (Betrag) der Temperaturkurve (e-Funktion) eine Gerade, so liegt deren Schnittpunkt mit der Endtemperaturgeraden beim Zeitpunkt RC . Dies ist gleichzeitig die 63% Marke, auf welche die Funktion nach der Zeit $R \cdot C$ abgefallen ist.

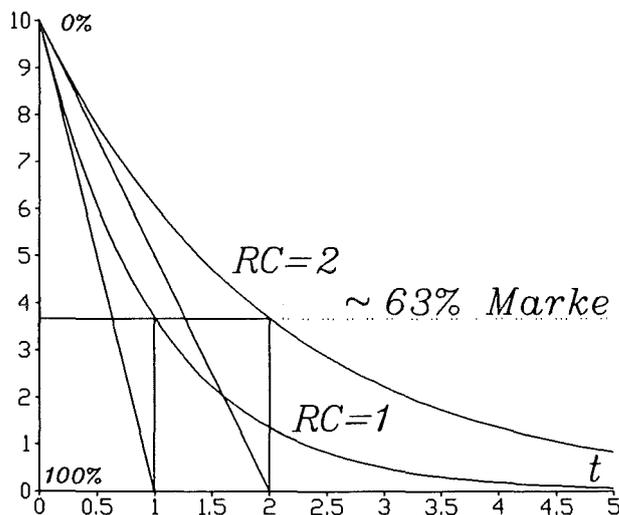


Abb. 9 Zeichnerische Bestimmung der Zeitkonstante einer e-Funktion (Abkühlkurve)

$$T = \frac{Q_0}{m_i \cdot c_{wi}} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (37)$$

$$T' = \frac{Q_0}{m_i \cdot c_{wi}} \cdot \frac{-1}{R \cdot C} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (38)$$

Die Steigung zur Zeit $t=0$ ist

$$a = \frac{Q_0}{m_i \cdot c_{wi}} \cdot \frac{-1}{R \cdot C} \quad (39)$$

eine Gerade

$$y = a \cdot t + \frac{Q_0}{m_i \cdot c_{wi}} \quad (40)$$

schneidet die Zeitachse bei $y=0$:

$$0 = \frac{Q_0}{m_i \cdot c_{wi}} \cdot \frac{-1}{R \cdot C} \cdot t + \frac{Q_0}{m_i \cdot c_{wi}} \quad (41)$$

an der Stelle:

$$t = R \cdot C = \tau \quad (42)$$

Der Wert der Funktion (37) ist an dieser Stelle:

$$T = T_0 \cdot e^{-\frac{RC}{RC}} \cong T_0 \cdot 0.368 \quad (43)$$

D.h. der Temperaturwert ist zu diesem Zeitpunkt um ca. 63% abgefallen.
Der Widerstand R_i für einen Ausgleichsvorgang berechnet sich nach Gleichung (22).

$$R_i = \tau \cdot \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \quad (44)$$

Diese Messungen sollten bei relativ niedrigen Temperaturunterschieden zur Umgebung durchgeführt werden, um eine Verfälschung der e-Funktion durch Wärmeverluste zu minimieren.

4.3.1 Graphische Bestimmung der "Inneren Zeitkonstante" und der Wärmeverlustzeitkonstante einer Anordnung von zwei WK's.

Abb. 10 zeigt den Temperaturverlauf einer kurzzeitig beheizten Herdplatte, und den Temperaturverlauf eines darauf liegenden Messingzylinders. Für die Wärmekopplung wurde ein Aluminiumblech und Wärmeleitpaste verwendet.

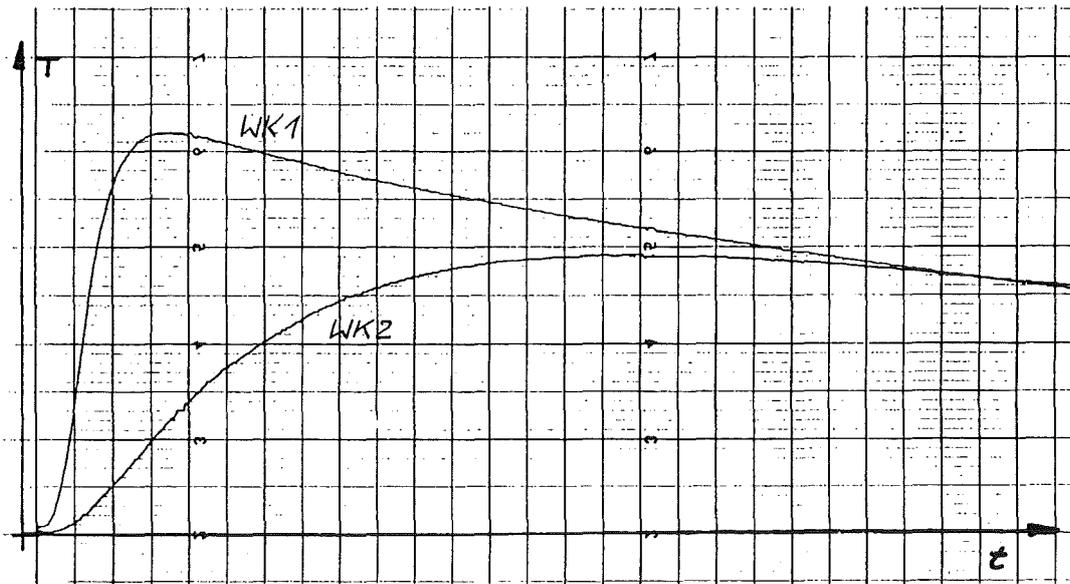


Abb. 10 Temperatenausgleichsvorgang der Kochplatten - Messingzylinder - Anordnung. x-Achse: 1min/Div. y-Achse: 1K/Div.

Der Ausgleichsvorgang der Temperaturen ist nach etwa 25 Minuten bis auf einen kleinen Fehler abgeschlossen. Das Gefälle des Temperaturrückganges ab dieser Stelle, in $^{\circ}/\text{min.}$, ist das Maß für den Wärmeverlust der Anordnung an die Umgebung. Der Wärmeverlust der Herdplatte ist wegen ihrer höheren Temperatur und ihrer größeren Oberfläche sehr viel größer als der des Kupferblocks. Der Wärmeverlust wird vereinfacht als proportional dem Temperaturunterschied zwischen Objekt und Umgebung angenommen. Der daraus resultierende Temperaturverlauf folgt nach den Überlegungen in Abschnitt 3.2.1 ebenfalls einer e-Funktion. Abb. 11 zeigt den Temperaturverlauf der Abkühlkurve der gesamten Anordnung. Mit dem Verfahren aus Abb. 9 läßt sich aus Abb. 11 die Zeitkonstante τ_{ges} des Wärmeverlustes ermitteln.

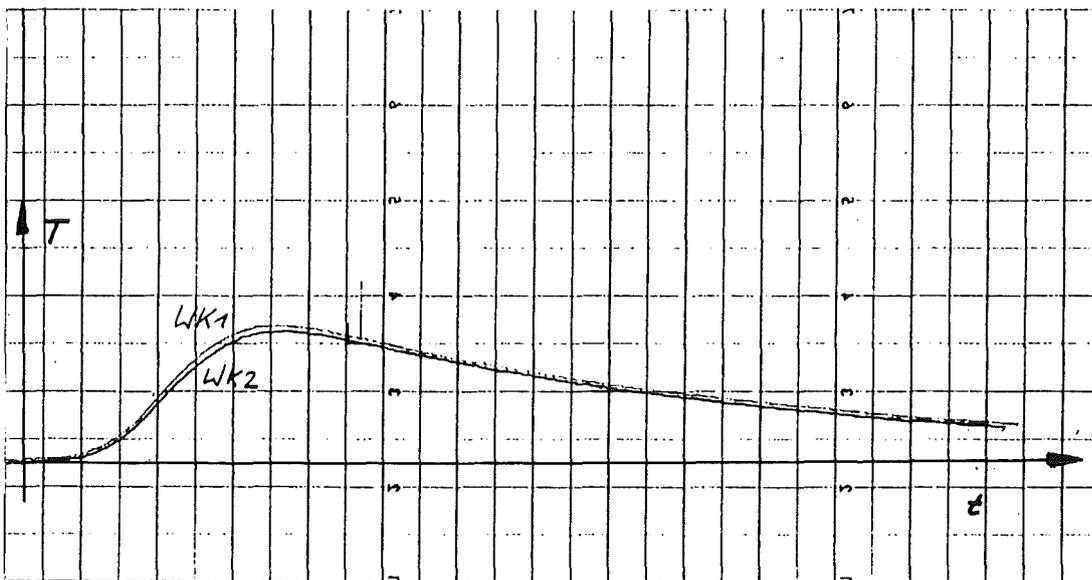


Abb. 11 Verlauf der Abkühlkurven der gesamten Anordnung x-Achse: 4min/Div.

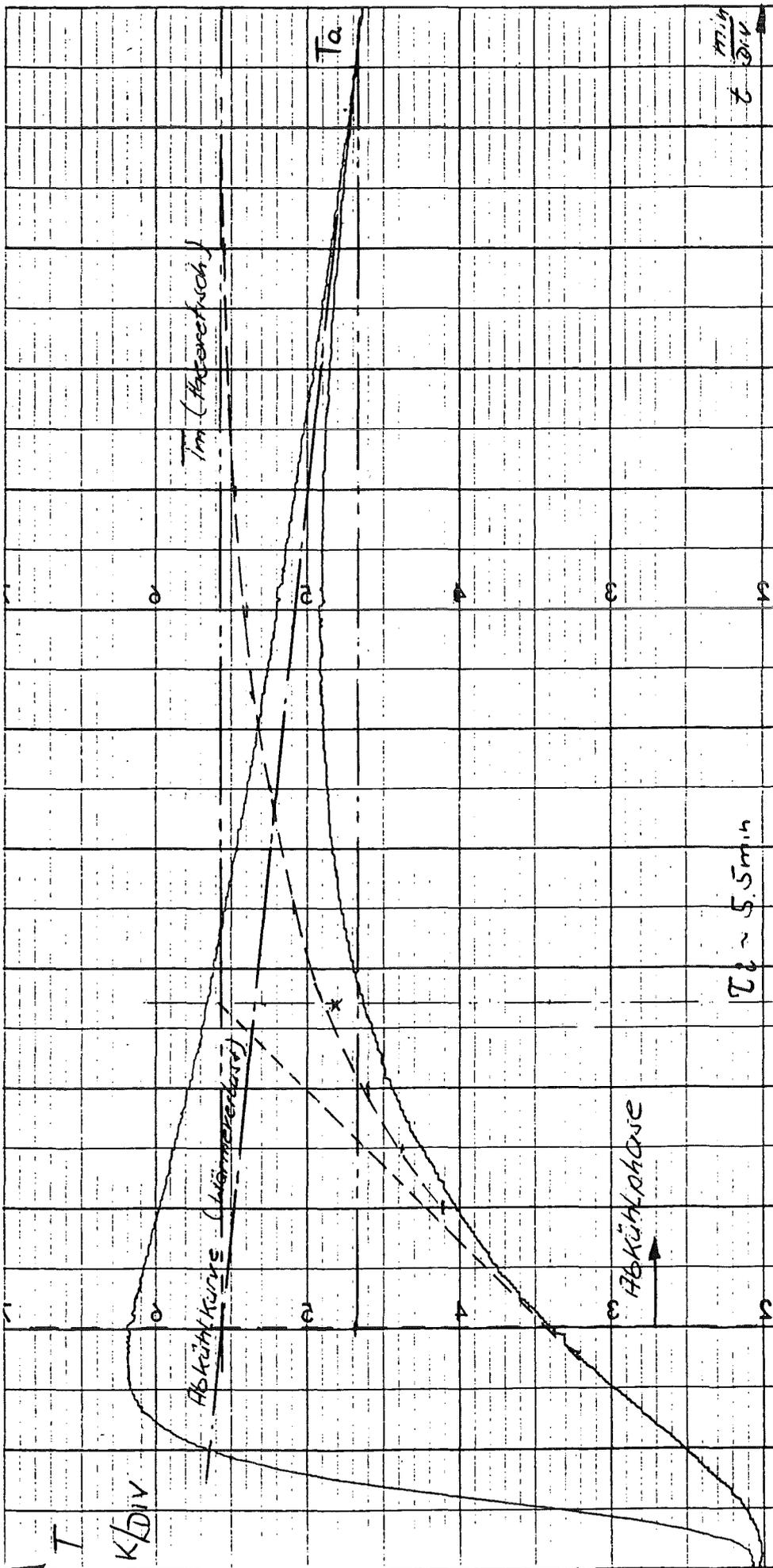


Abb. 10a Zeichnerische Bestimmung der Zeitkonstante τ_i aus Abb.10

Für die zeichnerische Ermittlung der "inneren Zeitkonstante" müssen in Abb. 10a die Temperaturverluste durch Abkühlung addiert werden, um die theoretischen Verläufe der Temperaturen ohne Wärmeverluste zu erhalten. Im vorliegenden Fall ist die Zeitkonstante der Wärmeverluste sehr viel größer als die "innere Zeitkonstante", so daß die entsprechende Abkühlkurve Abb.11 in Abb. 10a als Gerade dargestellt werden kann.

Verlängert man das Ende der Kurve durch eine Gerade bis zum Schnittpunkt T_a mit der Temp.-Achse bei $t=0$, so liegt diese Gerade für die Kochplatte sicher unterhalb und für den Kupferblock oberhalb der tatsächlichen Abkühlkurve. Die Temperatur T_a ist somit eher kleiner als die Temperatur T_m ohne Wärmeverluste. Die beiden Temperaturkurven würden somit näherungsweise die Temperatur T_m erreichen.

Beide Kurven werden durch die Addition der Temperaturabfälle pro Zeiteinheit korrigiert und nach der Methode in Abb.9 daraus die Zeitkonstanten ermittelt. Die Zeitkonstante des Systems liegt nun zwischen den beiden ermittelten Werten.

Eine einfachere Methode ergibt sich für Anordnungen mit relativ geringem Wärmeaustausch. Man legt den Zeitpunkt $t=0$ an den Anfang des fallenden Teils der Temperaturkurve der wärmeren WK. Da beide Temperaturkurven gemäß Gleichung 27 die gleiche Zeitkonstante haben, ist der Schnittpunkt der Geraden, mit den Steigungen der Kurven beim Zeitpunkt $t=0$, gleich oder kleiner der Endtemperatur der beiden WK's. Er ist auch gleichzeitig der Zeitpunkt $t=RC$ auf der Zeitachse gemessen von diesem Zeitpunkt $t=0$ aus (nicht dargestellt).

Durch die Normierung der Regelgrößen in Abschnitt 4.2 ergibt sich für die Simulationsschaltung in Abb. 6 für die Spannung

$U_0 = f(T_0) = 0\text{Volt}$. und für die Widerstände R_{a1}, R_{a2} und R_{a3} gilt:

$$\frac{1}{R_{ges.}} = \frac{C_{ges.}}{\tau_{ges.}} = \frac{C_1}{\tau_1} + \frac{C_2}{\tau_2} + \dots + \frac{C_i}{\tau_i} \quad (45)$$

$$\frac{1}{R_{ges.}} = \frac{1}{R_{a1}} + \frac{1}{R_{a2}} + \dots + \frac{1}{R_{ai}} \Rightarrow \tau_{ges.} = R_{ges.} \cdot C_{ges.} \quad (46)$$

Dies bedeutet, daß bei einer Abschätzung der einzelnen Widerstandswerte, für die elektrische Simulation der Wärmeverluste, das Produkt aus deren Parallelschaltung $R_{ges.}$ und der Summe aller Schaltungskapazitäten gleich der Abkühlzeitkonstante der gesamten Anordnung sein muß.

4.3.2 Überblick über die verschiedenen Zeitkonstanten der Heizstrecke

Innere Zeitkonstanten T_{ij} ; Wärmeverlust bzw. Wärmeaustauschzeitkonstante T_{ai} ;

Energetische Zeitkonstante T_s .

Zu beachten ist, daß für die Aufheizphase und die Abkühlphase die verschiedenen Zeitkonstanten T_{ij} und T_{ai} dominant sind und sehr verschieden sind. Die Systemzeitkonstante τ_s kennzeichnet das Verhältnis der maximal verfügbarer Heizleistung zum thermischen Speichervermögen der Heizstrecke (12)

5. Das "Electronic Circuit Analysis Program"

Das hier verwendete "Electronic Circuit Analysis Program" ist ein Produkt der Firma Spectrum Software und wird unter dem Namen "Micro-Cap IV" angeboten /2/. Es ermöglicht die zeichnerische Erstellung von elektrischen Schaltungen aus einem Vorrat von elektrischen Bauelementen, die durch besondere mathematische Modelle /8/ speziell für die softwaremäßige Simulation von elektronischen Schaltungen entwickelt wurden. Diese sogenannte Modellierung von Bauelementen kann entweder über einen physikalischen, einen verhaltensbezogenen, oder einen schaltungstechnischen Ansatz erfolgen /7/ S14. Dabei ist es möglich komplexere Bauelemente aus bereits definierten einfacheren Bauelementen zusammenzufügen. Dieser in /7/ beschriebene schaltungstechnische Ansatz wurde in einem übertragenen Sinn für die Simulation der Heizstrecke verwendet. Ein Modellierungsbeispiel mit physikalischem Ansatz wird in 5.4 kurz erläutert.

Durch die Möglichkeit Schaltungsparameter automatisch, schrittweise zu verändern, können spezielle Eigenschaften von elektrischen Schaltungen untersucht und optimiert werden. Die Ergebnisse stehen wahlweise als Tabellen oder Graphiken mit frei wählbaren Variablen zur Verfügung.

Weitergehend soll hier jedoch auf dieses Programm nicht eingegangen werden, da die angestellten Überlegungen sich auch in anderen Programmen dieser Art nutzen lassen.

5.1 Verhalten der Simulationsschaltung im Simulationsprogramm

Im Beispiel in Abschnitt 4. waren nur zwei WK's für eine Messung bzw. Rechnung zugänglich. Um aber das zeitliche Maximum der Temperatur der WK1 in der Simulation beeinflussen zu können, muß die WK1 in zwei WK's aufgeteilt werden. Die für die WK1 festgelegte Kapazität wird auf zwei Integratoren verteilt. Dabei müssen die technischen Verhältnisse der Kochplatte berücksichtigt werden. Der Bereich der Heizwicklung wird erfahrungsgemäß auf ca. 700°C erhitzt. Im Dauerbetrieb muß soviel Wärme abfließen, daß die Heizwicklung nicht überhitzt wird. Andererseits muß im Nahbereich um die Heizwicklung nach 5s soviel Energie gespeichert sein, um die Kochplatte während der folgenden ca. 180s um 6.4K zu erwärmen. Nimmt man für diesen Nahbereich nach 5s Heizdauer eine mittlere Temperatur von 100°C an, so braucht man dafür eine WK mit der Speichereigenschaft von ca. 100J/K. Daraus würde eine Aufteilung der Simulationskapazitäten der WK1 im Verhältnis von ca. 13:1 folgern.

5.2. Schaltungsparameter

Die Zusammenfassung der bisher ermittelten Schaltungsparameter ergibt somit folgenden Stand:

$c_1=5.5\mu\text{F}$; $c_2=71.5\mu\text{F}$; $c_3=23\mu\text{F}$

$R_e=700\text{k}$; $R_{j1}=1\text{meg}$; $R_{j2}=13\text{meg}$;

$R_{\text{ges}}=75\text{M}\Omega$ für die Zeitkonstanten der Wärmeverluste entsprechend (46) aufzuteilen.

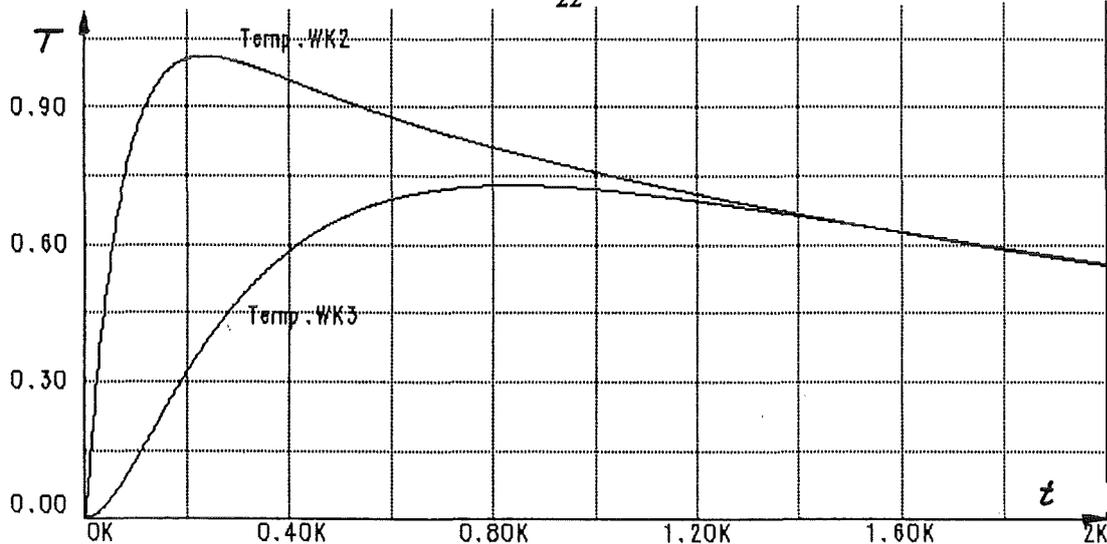


Abb. 12 Verlauf der Spannungen an den Integratoren 2 und 3 nach einer Einschaltdauer der maximalen Leistung von 10 Sekunden. Diese Größe ist im Diagramm nicht dargestellt.

Das Ziel ist die Übereinstimmung der Kurven WK2 in Abb. 10 und WK2 Abb. 12 zu erreichen. Die Kurven der WK1 dienen nur zur Veranschaulichung.

Der Vergleich der Kurven zeigt im Bereich der Verzugszeit, t_d , S183, noch deutliche Unterschiede. Im Abschnitt 6 wird daher eine Simulationsschaltung mit 5 WK's verwendet. Dort zeigt sich auch, daß bereits mit 4 WK's die Simulation einer ausreichend großen Verzugszeit möglich ist. Wichtiger als die Berechnungen von einzelnen WK's ist naturgemäß die tatsächliche Übereinstimmung der Eigenschaften der Simulationsschaltung mit dem zu regelnden Objekt. Durch Experimentieren mit der Aufteilung in einzelne WK's (C_j), deren Wärmeleitfähigkeiten (R_{ij}) untereinander und die Wärmeleitfähigkeiten (R_{ai}) des Wärmeaustausches an die Umgebung, können notwendige Korrekturen am Kurvenverlauf erzielt werden. Die Simulation einer größeren Vorhaltezeit ist nur durch Erhöhung der Anzahl der Integratoren (WK's) möglich.

5.3. "Stepping" von Schaltungsparametern

Durch die Option "Stepping" im Analyseprogramm können Kurveneigenschaften als Funktion von Schaltungsparametern untersucht und optimiert werden.

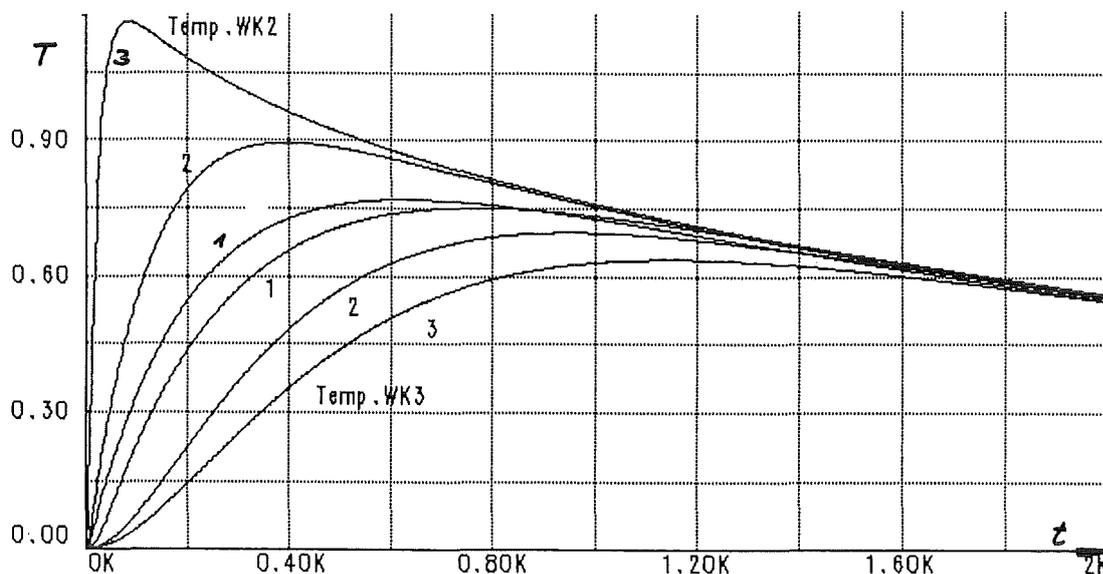
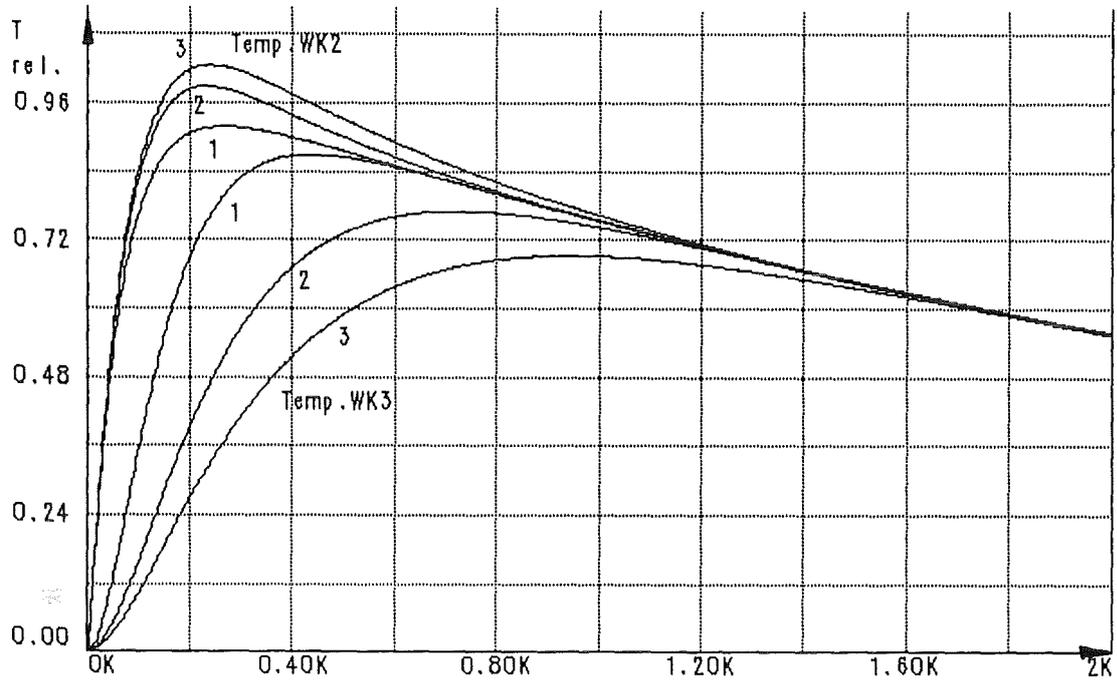
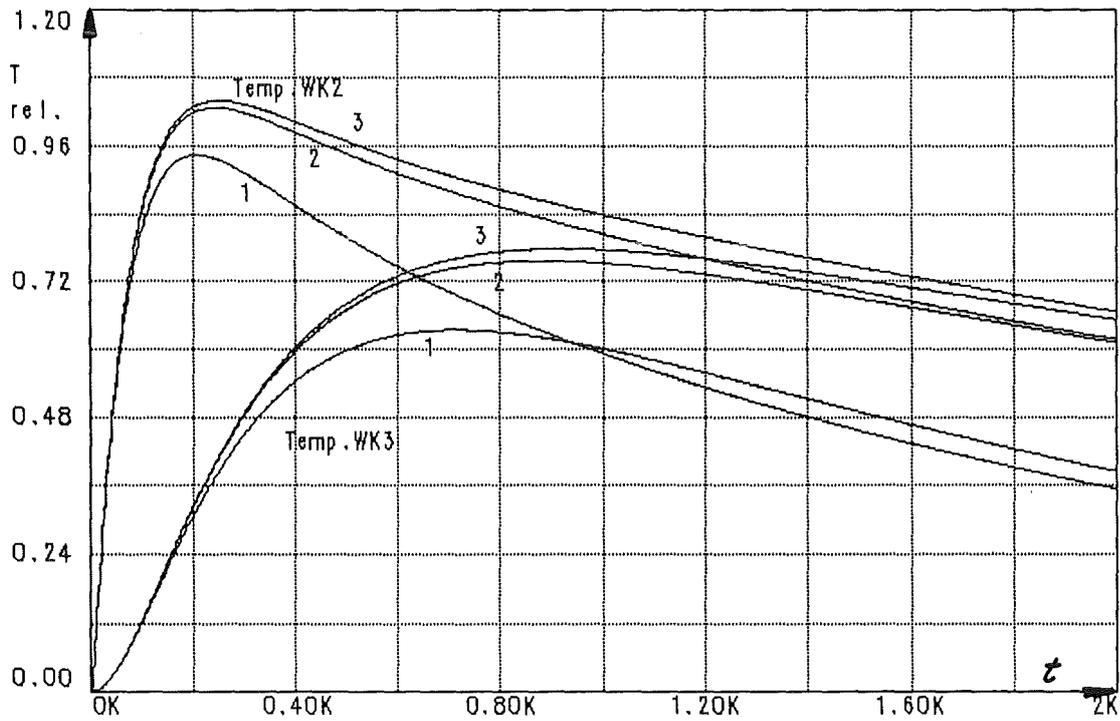
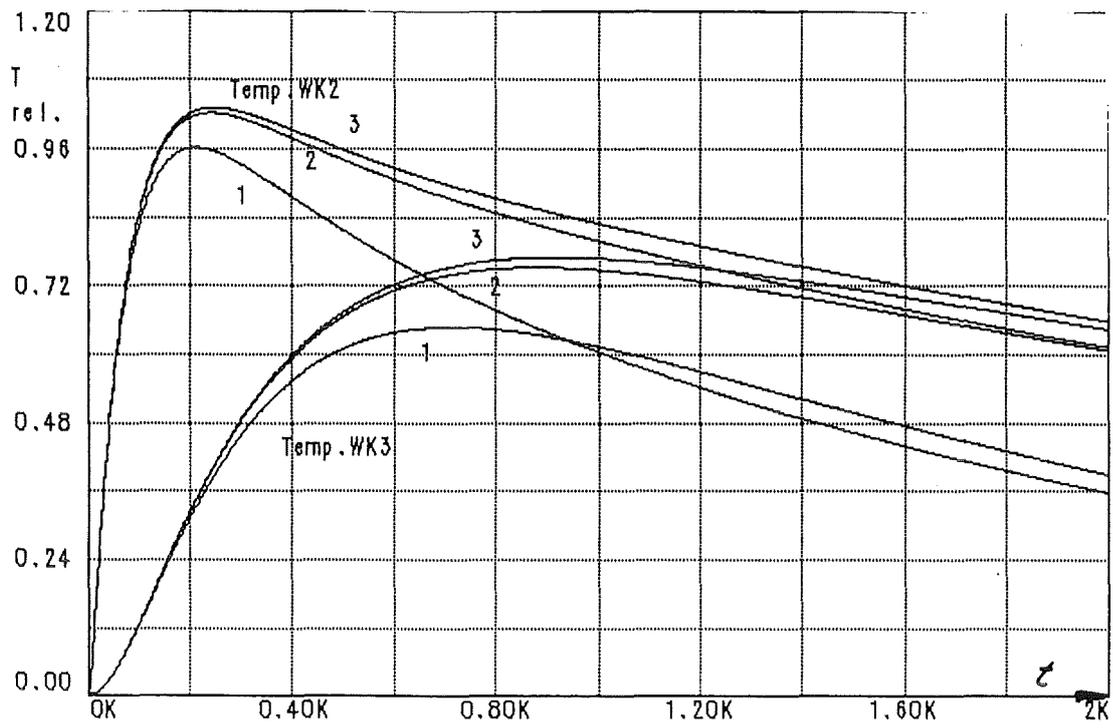
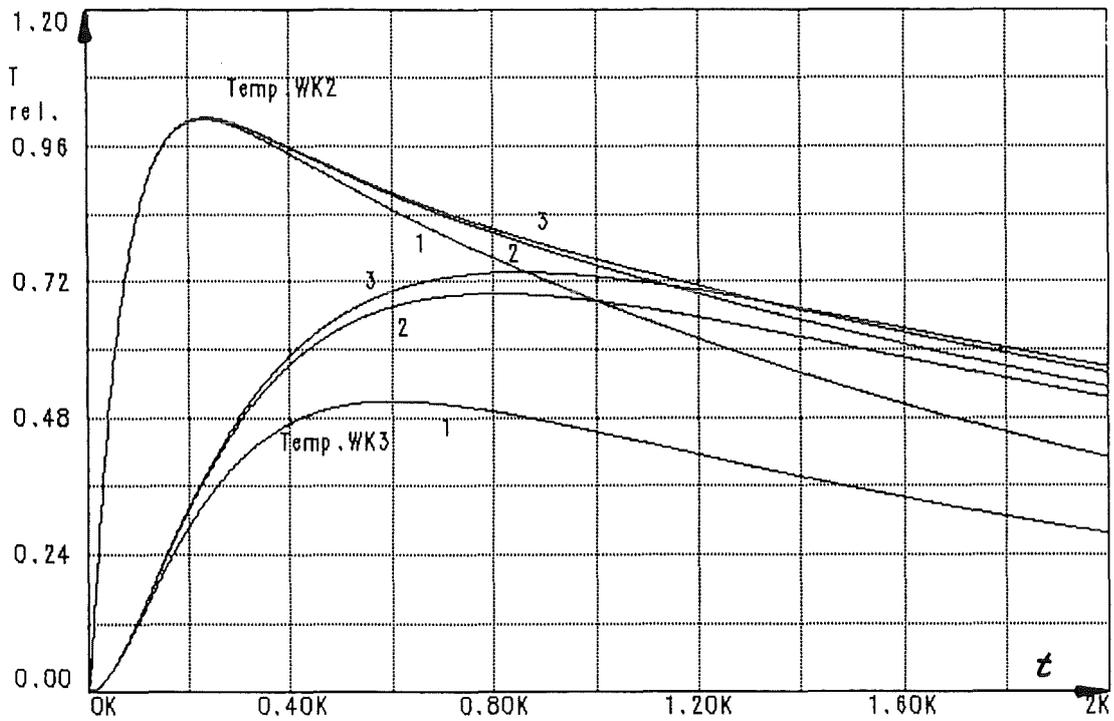


Abb. 13 Stepping von R_{ij} (Abb. 6)

Abb. 14 Stepping von R_{j2} (Abb. 6)Abb. 15 Stepping von R_{a1} ; (Abb. 6)

Abb. 16 Stepping von R_{a2} (Abb. 6)Abb. 17 Stepping von R_{a3} (Abb. 6)

Ohne besondere Anstrengungen können aus den Abb. 13 bis 17 die Parameter entnommen werden, die eine optimale Anpassung der Kurven in Abb. 12 an die Kurven in Abb. 10 ergeben. Es sind dies:

$$R_{i1}=2\text{meg}, R_{i2}=13\text{meg}, R_{i3}=18\text{meg}; R_{a1}=R_{a2}=R_{a3}=225\text{meg}$$

Leider kann jeweils nur ein Schaltungsparameter schrittweise verändert werden, sonst könnten auch die Werte der Kondensatoren untereinander in dieses Optimierungsverfahren einbezogen werden. Darüber hinaus können solche Untersuchungen selbstverständlich durch manuelle Eingabe der Werte erfolgen.

Die endgültige Version der Simulationsschaltung für eine optimierte Übereinstimmung des experimentellen mit dem simulierten Temperaturverlauf ergab sich mit 4 WK's. Die Kapazitäten wurden so aufgeteilt, daß die im System auftretenden Temperaturen etwa den physikalischen Gegebenheiten des Versuchsaufbaus entsprachen.

5.4. Simulation einer mathematischen Formel

Im Gegensatz zu der bisher benutzten schaltungstechnischen Simulation von wärmetechnischen Vorgängen, bei der eine physikalische Gegebenheit in einen Schaltplan umgesetzt wird /7/ ist es möglich, mathematisch formulierte Zusammenhänge mehr oder weniger direkt in solche Schaltungen einzubringen. Neben dem Vorrat von mathematisch modellierten Bauelementen in den Simulationsprogrammen gibt es mathematisch gesteuerte Strom- und Spannungsquellen, mit deren Hilfe sich mathematisch formulierte physikalische Vorgänge simulieren lassen.

An einem Beispiel eines zusätzlichen Wärmeaustauschelementes durch Wärmestrahlung an der letzten WK (INT3) in Abb. 6 soll diese Vorgehensweise aufgezeigt werden.

Bekanntermaßen ist der breitbandige Wärmeaustausch durch Wärmestrahlung proportional T^4 .

Für den einfachsten Fall des Wärmeaustausches zwischen zwei parallelen ebenen Flächen großer Ausdehnung gilt für die Wärmestromdichte D_s die Beziehung:

$$D_s = \frac{C_s}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad /1/ \quad (48)$$

mit $C_s = 5.77 \text{ Watt/m}^2\text{Grad}^4$ /7/ und T in Kelvin
 ϵ_1 =Emissionsgrad der Oberfläche 1 T_1 (K)=Temperatur der Oberfläche 1
 ϵ_2 =Emissionsgrad der Oberfläche 2 T_2 (K)=Temperatur der Oberfläche 2

Die Ausgangsspannung U_3 des INT3 in Abb. 6 simuliert die Temperatur der WK3, die Eingangsspannung U_0 des IC10 die Umgebungstemperatur. Für die Verwendung dieser Größen in (48) müssen diese in Kelvin proportionale Größen umgewandelt werden.

Der Formelausdruck für die gesteuerte Spannungsquelle U_s ist damit:

$$U_s = ((U_3 \cdot x + 273K)^4 - (U_0 \cdot x + 273K)^4) \cdot Konst. \quad (49)$$

mit dem Normierungsfaktor:

$$x = \frac{T_{\max}(K)}{U \max}$$

Mit einem Widerstand R_{S1} zwischen der Spannungsquelle und dem Eingang des INT3 wird der dem Wärmestrom durch Strahlung entsprechende Integrationsstrom eingestellt. Bei positiven Vorzeichen wird Wärme aus der Umgebung aufgenommen, bei negativem Vorzeichen Wärme abgegeben.

Z.B. maximale Strahlungsleistung bei maximaler Temperaturdifferenz verhält sich zur maximal zuführbaren Leistung wie der Eingangswiderstand R_e zum Widerstand R_{S1} .

Auf die Darstellung der so veränderten Simulationsschaltung wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

6. Verhalten der Simulationsschaltung im Regelkreis

Das Verhalten der optimierten Simulationsschaltung in einem einfachen Regelkreis Abb. 18 mit einem PI-Regler wird in Abb. 19 mit verschiedenen Integrationszeitkonstanten als Parameter wiedergegeben. Es muß darauf geachtet werden, daß die Stellgröße für eine Heizungssimulation das Vorzeichen nicht ändern darf.

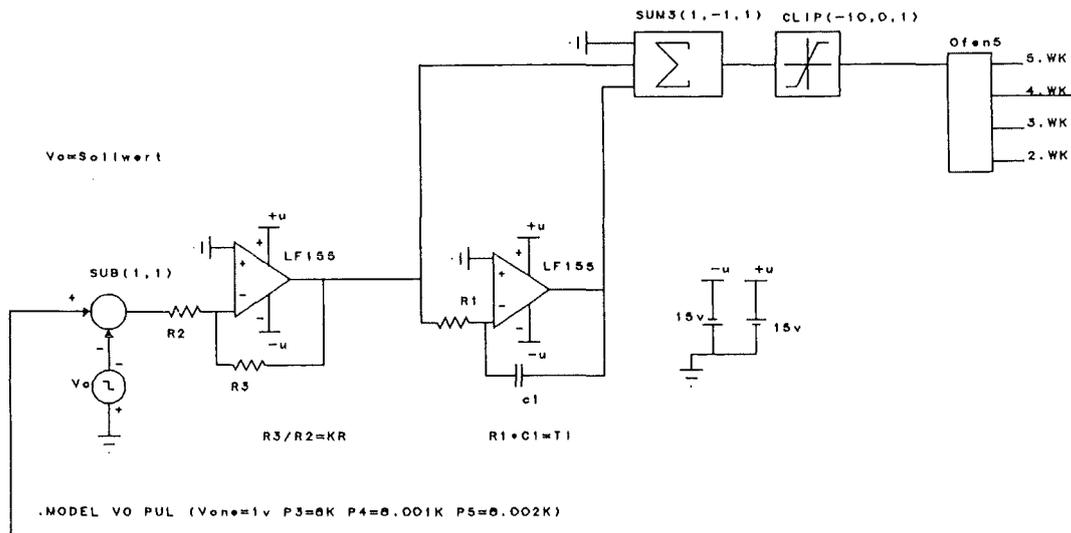


Abb. 18 Regelkreis mit Simulationsschaltung als "Macro" "Ofen"

Ein "Macro" ist die Zusammenfassung einer komplexen Schaltung von bereits modellierten Bauelementen zu einem Bauteil mit neuem Namen und Schaltzeichen.

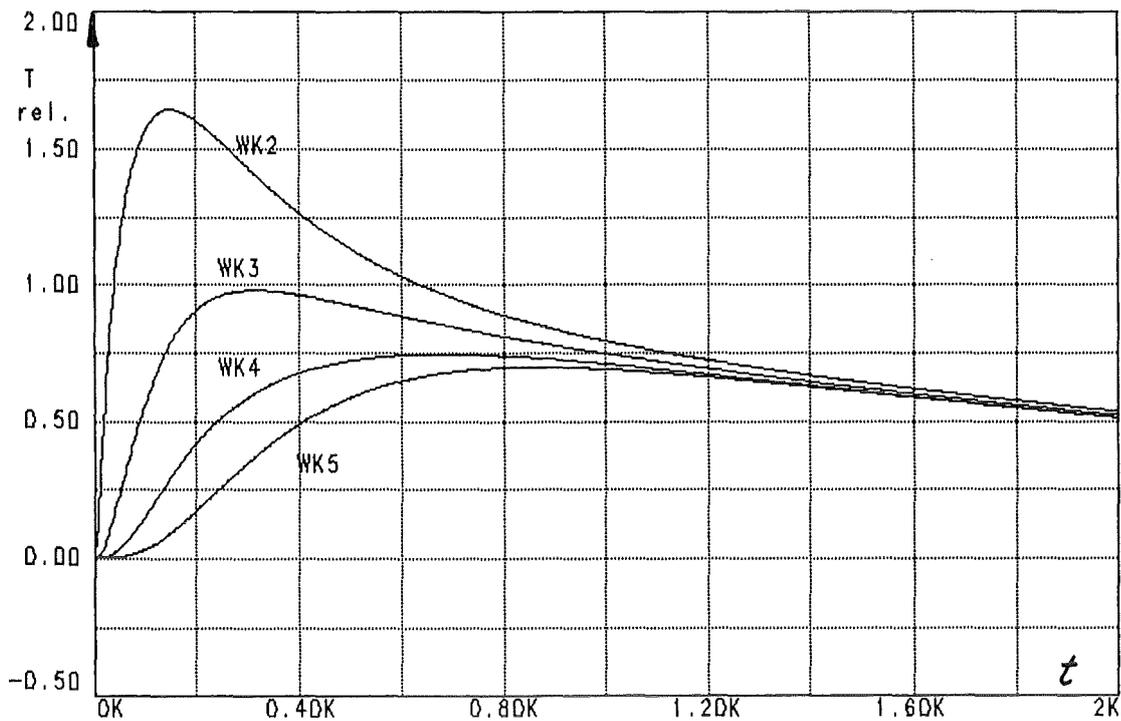


Abb. 19 Temperaturverläufe einer Simulationsschaltung mit 5 WK's

6.1 Optimierung des Regelungsverhalten durch "Stepping" des K-Faktors und der Integrationszeitkonstante

Eine optimale Regelung ist im wesentlichen dadurch gekennzeichnet, daß der gewünschte Sollwert möglichst schnell erreicht, und danach möglichst konstant gehalten wird. Ein PI-Regler hat das Übertragungsverhalten:

$$F_R = K_R \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right) \quad /5/, S192 \quad (47)$$

F_R = Übertragungsfunktion

$p = j \cdot \omega \cdot t$

T_i = Integrationszeitkonstante

K_R = Verstärkungsfaktor

Der Faktor K_R wird in der Schaltung Abb. 18 durch Änderung von R_3 , die Integrationszeitkonstante durch Änderung von C_1 variiert.

Für die folgenden Beispiele wurde die Simulationsschaltung auf 5 WK's erweitert. Die Summe der Integrationskondensatoren bleibt, wie auch die Summe der Leitwerte der Widerstände für den Wärmeaustausch mit der Umgebung. Die Aufteilung der Kondensatoren C_i und die Festlegung der Widerstände R_{ij} wurde durch "Stepping" optimiert.

Abb. 20 zeigt das Regelverhalten des Regelkreises in Abb. 18, durch die, bereits durch das Ergebnis in Abb. 19 eingeschränkte, schrittweise Änderung von R_3 ; Abb. 21 zeigt die Vergrößerung dieses Regelverhaltens ab 3.26 ks bis 8 ks (2.22 h).

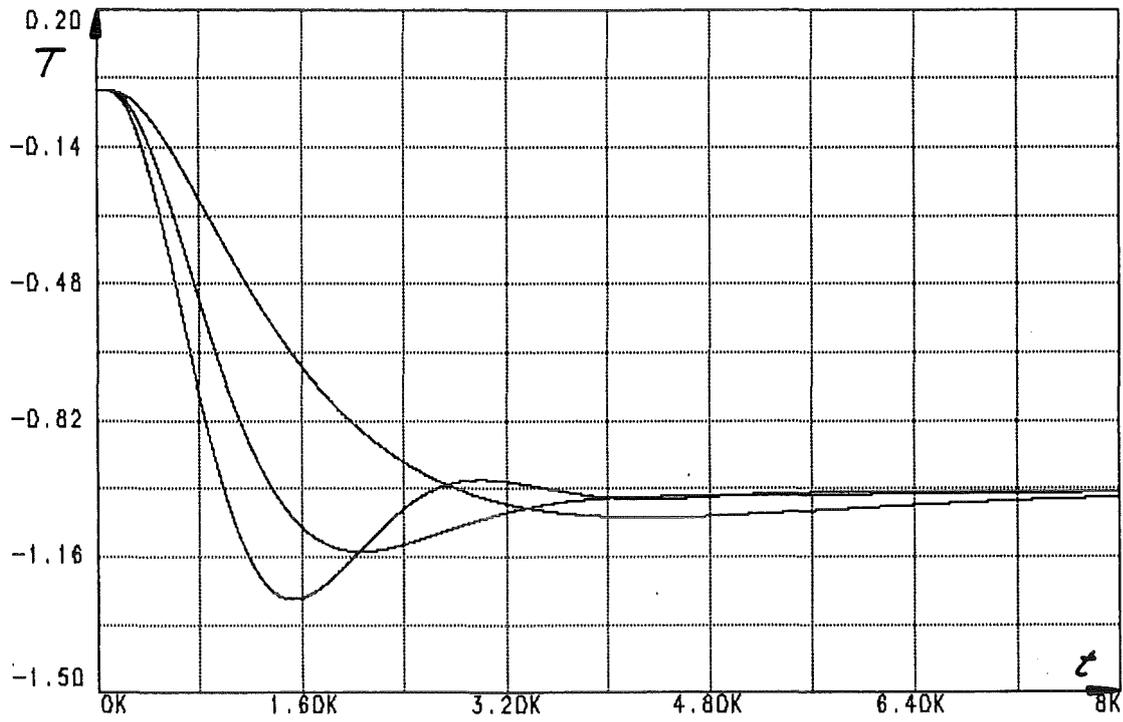


Abb. 20 Optimierung der Regelung durch "Stepping" des K-Faktors (R3 Abb.18)

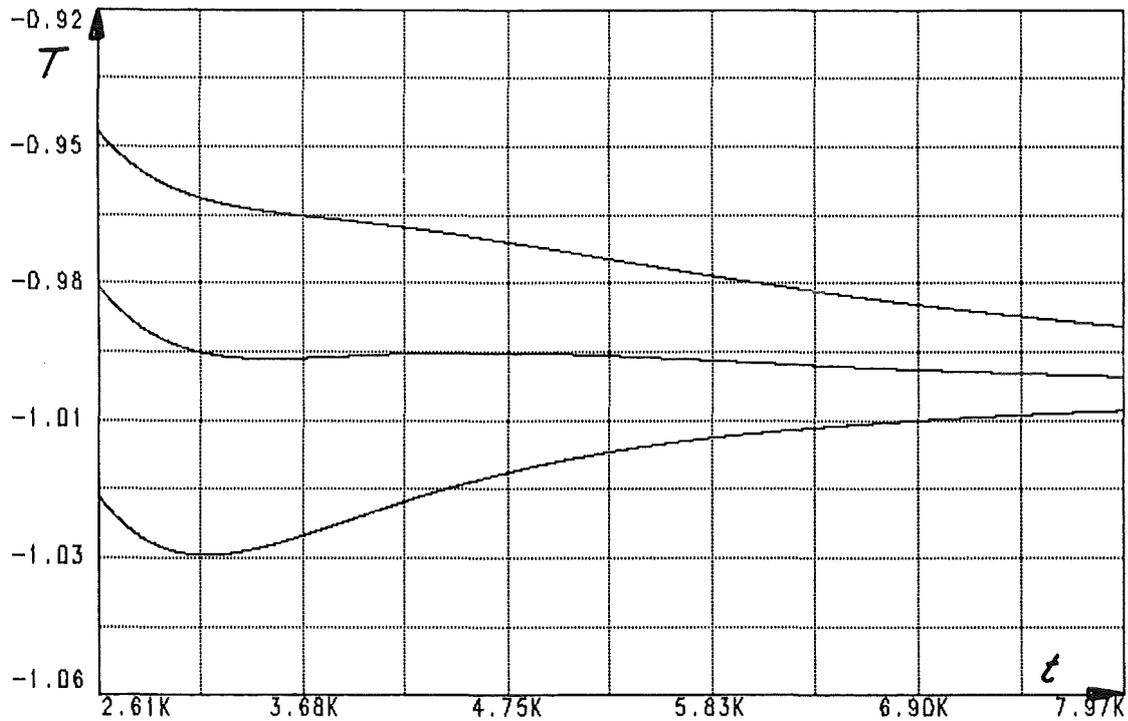


Abb. 21 Weitere Optimierung durch Ausschnittvergrößerung

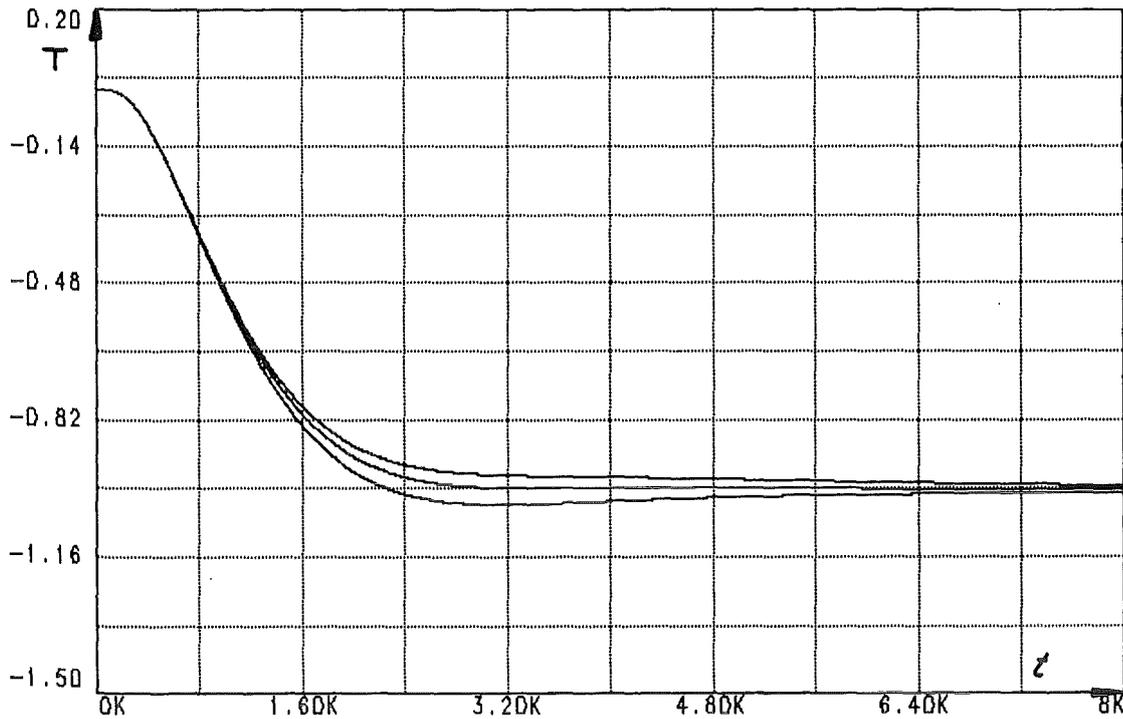


Abb. 22 Optimierung durch "Stepping" der Integrationszeitkonstante (C_1 Abb. 18)

7. Schlußbemerkung

Schon eine Heizstrecke mit geringen Verlusten kann mit einem konventionellen PID-Regler, wegen der verschiedenen Zeitkonstanten der Aufheiz- und Abkühlphasen, nicht befriedigend geregelt werden. Für komplexere Regelstrecken ist eine optimale Regelung vermutlich nur durch rechnerisch ermittelte Stellgrößen, mit den sensorüberwachten physikalischen Vorgängen an und in der Regelstrecke als Führungsgrößen, zu erreichen.

Durch geeignete elektronische Baugruppen, wie z.B. die Multifunktionsbaugruppe von Siemens, mit verschiedenen programmierbaren Rechenfunktionen, lassen sich jedoch schon Reglerkonzepte realisieren, in welchen Erkenntnisse über die Regelstrecke in Form von Schaltungsteilen zum Einsatz kommen, die eine Optimierung von Regelkreisen in Bezug auf bestimmte Regeleigenschaften ermöglichen.

Für die Beurteilung und Optimierung solcher Lösungen, für den behandelten Anwendungsfall, wurde die vorgestellte Simulationsschaltung entwickelt. Mit dem schaltungstechnischen Ansatz der Modellierung eröffnet sich ein weites Anwendungsfeld. Es können nahezu beliebige physikalische Verhaltensweisen von Regelstrecken anschaulich durch elektrische Schaltungen simuliert, in Regelkreisen eingesetzt, und diese dann mit Simulationsprogrammen getestet und optimiert werden.

Literaturverzeichnis

- /1/ E.Schmidt
Einführung in die Technische Thermodynamik
Berlin (usw.): Springer - Verlag 1963

- /2/ Spectrum Software, Sunnyvale, USA
Micro-Cap 4 Ver. 2.00, 1992

- /3/ Siemens AG 1980
Technische Tabellen
ISBN 3-8009-1283-x

- /4/ Siemens AG
Multifunktionseinheit Teleperm D,
Betriebsanleitung 6DR1520

- /5/ O.Föllinger
Regelungstechnik
Berlin: Elitera-Verlag 1978

- /6/ W.Oppelt
Kleines Handbuch Technischer Regelvorgänge
Weinheim: Verlag Chemie GMBH 1960

- /7/ F.F.Protiwa;O.Apeldoorn
Unterlagen zum Trainingsseminar des
Simulationsprogramms PSPICE 5.1
Rosenheim: Fa.Tomatronik 1992

- /8/ P.W.Tuinenga
SPICE A Guide to Circuit Simulation and Analysis
Using Pspice
Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall 1989