Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 57 (1966)

Heft: 24

Artikel: Das Regelverhalten von Zweipunktreglern

Autor: Rudolphi, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916657

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 06.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

h_{12e1}, h_{12e2}, usw.	Spannungsrückwirkung bei offenem Eingang von Transistor TS_1, TS_2 usw. in Emitterschaltung. h-Vierpolparameter für Aussteuerung mit kleinem Signal
h_{11b}	Eingangswiderstand bei kurzgeschlossenem Ausgang. Transistor in Basisschaltung. h-Vierpolparameter für Aussteuerung mit kleinem Signal
h_{22b}	Ausgangsleitwert bei offenem Eingang. Transistor in Basisschaltung. h-Vierpolparameter für Aussteuerung mit kleinem Signal
α_{FE1}, α_{FE2}, usw.	Stromverstärkung vorwärts im statischen Betrieb von Transistor TS_1, TS_2 usw.
k	Ausgangsspannungsteilerverhältnis $k \approx \frac{R_{t2}}{R_{t1}}$
Δx_r	Regelabweichung

Literatur

[1] *H. Danklefsen* und *U. Hitz:* Eine transistorgeregelte Gleichstromquelle hoher Konstanz. Elektronik 9(1960)1, S. 25...26.

[2] *S. W. Wagner:* Stromversorgung elektronischer Schaltungen und Geräte. Verlag G. Schenk, Hamburg 1964.

[3] *J. Baugher:* Using Constant Current Power Supplies. Electronic Industries 21(1962)10, S. 148...152.

Adresse des Autors:
Roman Hug, dipl. Elektroingenieur ETH, Philips AG, Binzstrasse 38, 8045 Zürich.

Das Regelverhalten von Zweipunktreglern

Von *H. Rudolphi,* Zug

62 - 551.3

Ausgehend von der Übergangsfunktion einer Regelstrecke, charakterisiert durch eine Totzeit und eine Zeitkonstante, werden die Kenngrössen der Regelschwankung einer Anlage mit Zweipunktregelung formelmässig dargestellt. Die in der Handhabung etwas mühsamen Formeln sind in einem «kotierten Dreieck» graphisch dargestellt. Zusammen mit Nomogrammen zur Bildung von Ersatzübergangsfunktionen für den Messfühler und zur Ermittlung der Extremwerte der Regelschwankung wird das «kotierte Dreieck für Zweipunktregler» zu einem praktischen Hilfsmittel zur Beurteilung entsprechender Regelprobleme. Anhand von Beispielen ist die Brauchbarkeit der Methode dargelegt.

Partant de la fonction de transition d'une installation réglée, caractérisée par un temps mort et une constante de temps, les caractéristiques des variations de réglage d'une installation avec régulateur à deux paliers sont exprimées par des formules. Les formules un peu difficile à manier sont représentées graphiquement par un «triangle coté». Complété par des nomogrammes servant à la formation de fonction de transition de la sonde de mesure et à la détermination des valeurs extrêmes des variations de réglage, le «triangle coté pour régulateurs à deux paliers» constitue un auxiliaire pratique, facilitant le jugement des problèmes de réglage correspondants. Des exemples illustrent l'utilité de cette méthode.

1. Einleitung

Der Zweipunktregler ist vor allem in thermischen Anlagen ein häufig eingesetzter Apparat. Seine einfache Funktionsweise hat aber für den Regelvorgang Konsequenzen, die in vielen Fällen eine Überprüfung der Zulässigkeit der erwarteten Regelschwankung erforderlich macht, um Schäden an der Anlage zu verhüten. Aber auch die Erfüllung der geforderten Regelgenauigkeit ist beim Einsatz von Zweipunktreglern, die mit einer inhärenten Schwankung der Regelgrösse behaftet sind, nicht immer selbstverständlich. Die theoretische Regeltechnik bietet für solche Betrachtungen zwar geeignete Methoden an, die in ihrem Aufwand aber nicht immer dem zu lösenden Problem angemessen sind.

Auch die in dieser Arbeit angewendete, auf der Übergangsfunktion der Anlage beruhende Methode zwingt zu Rechnungen, die für den praktischen Betriebstechniker häufig eine Behinderung sind. Es war deshalb naheliegend, die rechnerisch ermittelten Formelgrössen graphisch darzustellen und als Nomogramm zu einer praktischen Arbeitsunterlage zu formen. Dass bei der Anwendung solcher Nomogramme nur mit sorgfältig ermittelten Eingangsgrössen gearbeitet werden sollte, ist klar. Die Ermittlung dieser Eingangsgrössen, nämlich die mathematischen Kennzahlen der messtechnisch aufgenommenen Übergangsfunktionen, ist deshalb entscheidend für die Zuverlässigkeit der ganzen regeltechnischen Betrachtung. Die Methoden der Messung einer Übergangsfunktion und ihrer Auswertung werden bei der Untersuchung der Einflüsse der Fühlerträgheit nur indirekt behandelt. Grundsätzlich werden die Übergangsfunktionen aber als bekannt vorausgesetzt. Hingegen wird dem Einfluss der Messverzögerung alle Beachtung geschenkt, und der allgemeinen Behandlung des Zweipunktreglers folgt eine ausführliche Darstellung des Einbezugs der Fühlerträgheit in die regeltechnische Untersuchung. Insgesamt ist aber die vorgelegte Methode als ein Näherungsverfahren zu klassifizieren.

2. Regelverhalten eines Zweipunktreglers ohne Rückführung und ohne Messverzögerung

Es werden folgende Buchstabensymbole verwendet:

t	Zeit
T_c	Zeitkonstante
T_{cs}	Zeitkonstante der Regelstrecke
T_{cm}	Zeitkonstante des Messorgans
T_{ce}	Ersatzzeitkonstante einer zusammengesetzten Übergangsfunktion
T_t	Totzeit
T_{ts}	Totzeit der Regelstrecke
T_{te}	Ersatztotzeit einer aus zwei Zeitkonstanten zusammengesetzten Übergangsfunktion
T_E	Einschaltzeit; Impulsdauer
T_A	Ausschaltzeit; Ausschaltdauer
T_Z	Zyklusdauer; Impulsabstand
x_r	Regelgrösse am Ausgang der Regelstrecke
$\dot{x}_r$	Änderungsgeschwindigkeit der Regelgrösse
${}^0X_r$	Mittelwert der Regelgrösse x_r
Δ^0X_r	Bleibende mittlere Regelabweichung
X_a	Stellbereich in Einheiten der Regelgrösse
x_d	Einstellwert
Δx_{rd}	Schaltdifferenz
x_m	von einem Messorgan (Fühler) gemessener Wert der Regelgrösse X.
$\hat{X}$	Scheitelwert einer Schwingung
$\check{X}$	Sohlenwert einer Schwingung
$\overset{\triangle}{X}$	Schwingungsweite

566–583

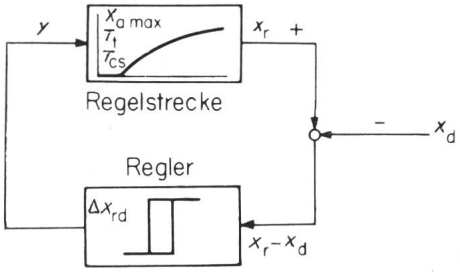

Fig. 1
Blockschaltbild eines Regelkreises mit Regelstrecke (Übergangsfunktion mit Totzeit und Zeitkonstante) und Zweipunktregler
y Stellgrösse; x_r variabler Wert der Regelgrösse; x_d Einstellwert; Δx_{rd} Schaltdifferenz; $X_{a\,max}$ max. Stellbereich der Regelgrösse; T_t Totzeit; T_{cs} Zeitkonstante

2.1 Berechnung der Kenngrösse des Regelverlaufes

Die Regelgrösse x_r und die Messgrösse x_m seien vereinbarungsgemäss identisch. Als gegebene Grössen werden angenommen (Fig. 1):

Regelstrecke: maximaler Stellbereich $X_{a\,max}$

Totzeit T_t

Zeitkonstante T_{cs}

Regler: Schaltdifferenz Δx_{rd} bzw. $\dfrac{\Delta x_{rd}}{X_{a\,max}} = \Delta x_{rd}^*$

Einstellwert: x_d bzw. $\dfrac{x_d}{X_{a\,max}} = x_d^*$

Alle auf den maximalen Stellbereich bezogenen Grössen werden mit * bezeichnet.

Der Verlauf der Regelgrösse wird beschrieben durch die Funktionen:

Aufheizen:

$$x_r^* = 1 - (1 - x_r^* \mid_{t=0})\, e^{-\frac{t}{T_{cs}}} = 1 - (1 - x_{r0}^*)\, e^{-\frac{t}{T_{cs}}}$$

Abkühlen:

$$x_r^* = x_r^* \mid_{t=0}\, e^{-\frac{t}{T_{cs}}} = x_{r0}^*\, e^{-\frac{t}{T_{cs}}}$$

In ausgeschaltetem Zustand sinkt die Regelgrösse nach der Funktion $x_r = x_{r0}\, e^{-t/T_{cs}}$ nach Durchlaufen des Einschaltpunktes $(x_d - \frac{1}{2}\Delta x_{rd})$ während der Totzeit T_t weiter ab (Fig. 2). Nach Ablauf der Totzeit erreicht sie den unteren Extremwert $\check{X}_r$ und beginnt sofort nach der Funktion $x_r = 1 - (1 - x_{r0})\, e^{-t/T_{cs}}$ anzusteigen, durchläuft den Ausschaltpunkt $(x_d + \frac{1}{2}\Delta x_{rd})$ und erreicht dann wieder nach Ablauf der Totzeit den oberen Grenzwert $\hat{X}_r$. Dieser Vorgang wiederholt sich zyklisch.

Die Extremwerte $\check{X}_r$ und $\hat{X}_r$ errechnen sich zu:

$$\check{X}_r^* = \left(x_d^* - \frac{1}{2}\Delta x_{rd}^*\right) e^{-\frac{T_t}{T_{cs}}}$$

$$\hat{X}_r^* = 1 - \left[1 - \left(x_d^* + \frac{1}{2}\Delta x_{rd}^*\right)\right] e^{-\frac{T_t}{T_{cs}}}$$

Damit ist auch die Regelschwankung gegeben:

$$\overset{\triangle}{X}_r^* = \hat{X}_r^* - \check{X}_r^* = 1 - (1 - \Delta x_{rd}^*)\, e^{-\frac{T_t}{T_{cs}}}$$

Aus den Extremwerten und der Formel für den Verlauf der Regelgrösse lassen sich die Schaltzeiten T_E und T_A, die Zyklusdauer T_Z, das Einschaltverhältnis ε und schlussendlich die mittlere Regelabweichung $\Delta^0 X_r$ bestimmen:

Ansatz:

$$\check{X}_r^* = \hat{X}_r^*\, e^{-T_A/T_{cs}}$$

$$\hat{X}^* = 1 - (1 - \check{X}_r^*)\, e^{-T_E/T_{cs}}$$

$$T_A = T_{cs} \cdot \ln \frac{\hat{X}_r^*}{\check{X}_r^*} = T_{cs} \cdot \ln \frac{e^{T_t/T_{cs}} - 1 + \left(x_d^* + \frac{1}{2}\Delta x_{rd}^*\right)}{x_d^* - \frac{1}{2}\Delta x_{rd}}$$

$$T_E = T_{cs} \cdot \ln \frac{1 - \check{X}_r^*}{1 - \hat{X}_r^*} = T_{cs} \cdot \ln \frac{e^{T_t/T_{cs}} - \left(x_d^* - \frac{1}{2}\Delta x_{rd}^*\right)}{1 - \left(x_d^* + \frac{1}{2}\Delta x_{rd}^*\right)}$$

$$T_Z = T_E + T_A = T_{cs} \cdot \ln \frac{(1 - \check{X}_r^*) \cdot \hat{X}_r^*}{(1 - \hat{X}_r^*) \cdot \check{X}_r^*} =$$

$$= T_{cs} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{e^{T_t/T_{cs}}\left[e^{T_t/T_{cs}} - (1 - \Delta x_{rd}^*)\right]}{x_d^*(1 - x_d^*) - \frac{1}{2}\Delta x_{rd}^*\left(1 - \frac{1}{2}\Delta x_{rd}^*\right)} \right.$$

$$\varepsilon = \frac{T_E}{T_Z} = {}^0X_r^* \quad \Delta^0 X_r^* = \varepsilon - x_d$$

Diese Formeln sind zwar recht verwickelt und unpraktisch, aber in der graphischen Darstellung werden wichtige Zusammenhänge deutlich (Fig. 3 und Tabelle I).

2.2 Näherungsrechnung für kleine Regelschwankung

Bei kleiner Regelschwankung ist es in befriedigender Näherung zulässig, den Verlauf der Regelgrösse zu linearisieren, indem eine konstante Anstiegsgeschwindigkeit im eingeschalteten und eine konstante Absinkgeschwindigkeit im ausgeschalteten Zustand herangezogen wird.

Nach den Ausführungen in Abschnitt 2.1 betragen an einer beliebigen Stelle x_r die beiden Geschwindigkeiten:

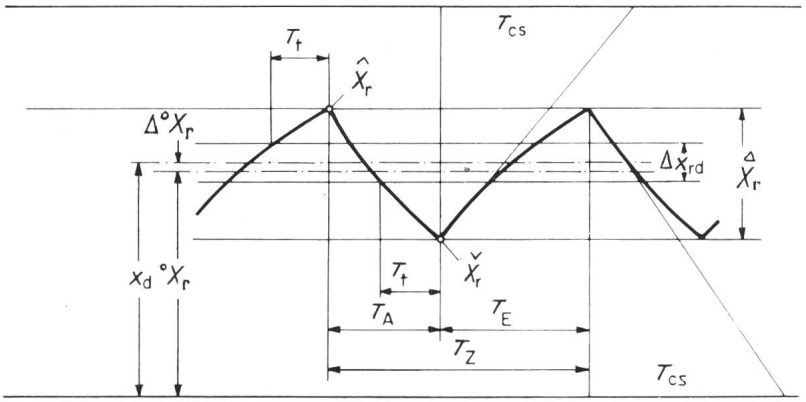

Fig. 2
Verlauf der Regelgrösse bei Zweipunktregelung ohne Messverzögerung
$^\circ X_r$ Mittelwert der Regelgrösse; $\hat{X}$ Scheitelwert der Schwingung; $\check{X}_r$ Sohlenwert der Schwingung; $\overset{\triangle}{X}_r$ Schwingungsweite; T_A Ausschaltzeit; T_E Einschaltzeit; T_Z Zyklusdauer
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

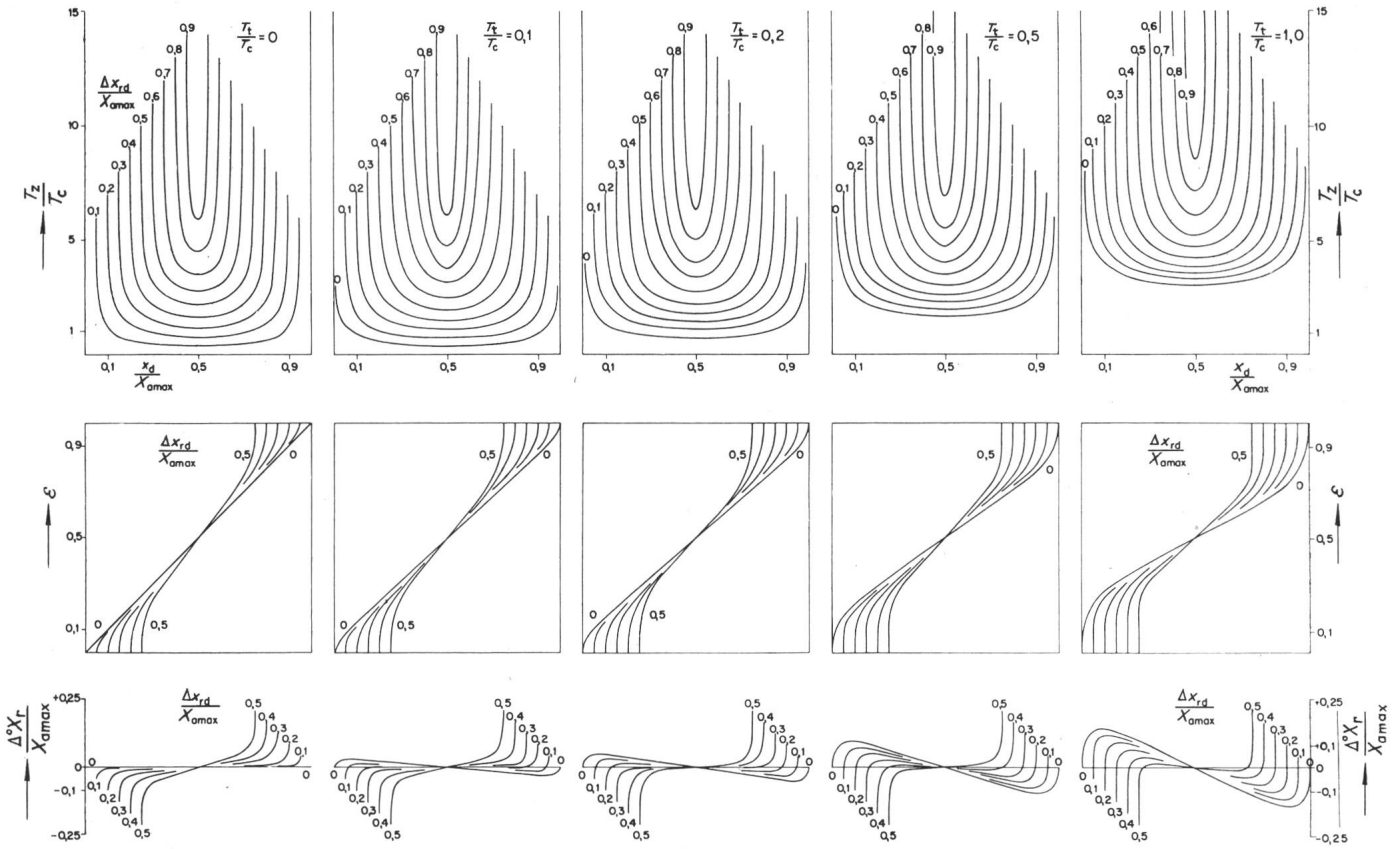

Fig. 3

Abhängigkeit der wichtigsten Kenngrössen einer Regelschwankung der Zweipunktregelung von den Kennzahlen der Regelstrecke und des Reglers, dargestellt in Funktion des Einstellwertes

T_t Totzeit; T_c Zeitkonstante; T_z Zyklusdauer; $\Delta^\circ X_r$ Bleibende mittlere Regelabweichung; $X_{a\,max}$ max. Stellbereich; x_d Einstellwert; Δx_{rd} Schaltdifferenz; ε Einschaltverhältnis

$$\dot{x}_{r\,Aus} = \frac{d\,(x_{r0}\,e^{-t/T_{cs}})}{dt} = \frac{x_r}{T_{cs}}$$

$$\dot{x}_r = \frac{d\,[X_{a\,max} - (X_{a\,max} - x_{r0})\,e^{-t/T_{cs}}]}{dt} = \frac{X_{a\,max} - x_r}{T_{cs}}$$

Diese Geschwindigkeiten müssen für den Mittelwert der Regelschwankung ${}^0X_r = \varepsilon\, X_{a\,max}$ berechnet werden, denn nur dann wird die Bedingung erfüllt:

$$\varepsilon = \frac{T_E}{T_Z} = \frac{\hat{X}^* + \check{X}^*}{2}$$

Extremwerte:

$$\check{X}_r^* = \left(x_d^* - \frac{1}{2}\,\Delta x_{rd}^*\right)\frac{T_t}{T_{cs}}\,\varepsilon$$

$$\hat{X}_r^* = \left(x_d^* + \frac{1}{2}\,\Delta x_{rd}^*\right)\frac{T_t}{T_{cs}}\,(1-\varepsilon)$$

Regelschwankung:

$$\overset{\triangle}{X}_r^* = \Delta x_{rd}^* + \frac{T_t}{T_{cs}}$$

Ausschaltzeit:

$$T_A = T_{cs}\,\frac{\overset{\triangle}{X}_r^*}{\varepsilon} = T_{cs}\,\frac{\Delta x_{rd}^* + T_t/T_{cs}}{\varepsilon}$$

Einschaltzeit:

$$T_E = T_{cs}\,\frac{\overset{\triangle}{X}_r^*}{1-\varepsilon} = T_{cs}\,\frac{\Delta x_{rd}^* + T_r/T_{cs}}{1-\varepsilon}$$

Zyklusdauer:

$$T_Z = T_{cs}\,\frac{\overset{\triangle}{X}_r}{\varepsilon\,(1-\varepsilon)} = T_{cs}\,\frac{\Delta x_{rd}^* + T_t/T_{cs}}{\varepsilon\,(1-\varepsilon)}$$

Einschaltverhältnis:

$$\varepsilon = \frac{T_E}{T_Z} = \frac{\check{X}_r^* + \check{X}_r^*}{2} = \frac{x_d^* + \frac{1}{2}\,T_t/T_{cs}}{1 + T_t/T_{cs}}$$

Mittlere Regelabweichung:

$$\Delta^0 X_r^* = \varepsilon - x_d^*$$

Diese Näherungsformeln, die durch Einsetzen von ε vervollständigt werden können, bringen im Vergleich zu dem korrekten Ausdruck nur den Vorteil einer etwas leichteren Handhabung, da sie nicht logarithmisch sind. Im übrigen sind die graphischen Darstellungen in Fig. 3 vorzuziehen.

Sehr praktisch sind aber zwei Faustformeln, die leicht abgeleitet werden können:

Regelschwankung:

$$\overset{\triangle}{X}_r = \Delta x_{rd} + X_{a\,max}\,T_t/T_{cs}$$

Minimale Zyklusdauer (bei $0{,}5 = \varepsilon = x_d^*$):

$$T_{Z\,min} = 4\,T_c\,\frac{\overset{\triangle}{X}_r}{X_{a\,max}} = 4\left(T_c\,\frac{\Delta x_{rd}}{X_{a\,max}} + T_t\right)$$

Gültig für:

$$\overset{\triangle}{X}_r < 0{,}1\,X_{a\,max}$$

2.3 Das «Proportionalverhalten» der Zweipunktregler

In der graphischen Darstellung der Funktion

$$\Delta^0 X_r = F\,(X_a, T_t, T_c, \Delta x_{rd}, x_d)$$

ist insbesondere bei kleinen Totzeiten ein mehr oder weniger grosser linearer Bereich charakteristisch. Innerhalb dieses Be-

Einfluss einer Änderung der gegebenen Grösse auf den Regelverlauf

Tabelle I

Gegebene Grösse	Regelschwankung $\overset{\triangle}{X}_r$	Zyklusdauer T_Z	Einschaltverhältnis ε	Mittlere Regelabweichung $\Delta^0 X_r$
X_a	Grösseres X_a grössere $\overset{\triangle}{X}_r$	Grösseres X_a kleinere T_Z	Grösseres X_a kleineres ε	Die Änderung einer Grösse ergibt je nach den übrigen Daten eine Vergrösserung oder Verkleinerung oder einen Vorzeichenwechsel der mittleren Regelabweichung, die bei $x_d = 0{,}5$ immer gleich Null ist, aber auch bei anderen Einstellwerten verschwinden kann.
T_t	Grösseres T_t grössere $\overset{\triangle}{X}_r$	Grössere T_t grössere T_Z	Unterhalb $x_d = 0{,}5$ grössere T_t grösseres ε	
			oberhalb $x_d = 0{,}5$ grössere T_t kleineres ε	
T_c	Grössere T_c kleinere $\overset{\triangle}{X}_r$	Grössere T_c grössere T_Z	Sofern Totzeit vorhanden, ergibt unterhalb $x_d = 0{,}5$ grössere T_c kleineres ε	
			oberhalb $x_d = 0{,}5$ grösseres T_c grösseres ε	
			ohne Totzeit kein Einfluss des T_c auf ε	
ΔX_{rd}	Grössere Δx_{rd} grössere $\overset{\triangle}{X}_r$	Grössere Δx_{rd} grössere T_Z	Unterhalb $x_d = 0{,}5$ ergibt grösseres Δx_{rd} kleineres ε	
			oberhalb $x_d = 0{,}5$ ergibt grösseres Δx_{rd} grösseres ε	
x_d	Kein Einfluss von x_d auf $\overset{\triangle}{X}_r$	$x_d = 0{,}5$ $T_Z = \min$	Grösserer x_d ergibt grösseres ε	
			bei $x_d = 0{,}5$ $\varepsilon = 0{,}5$	

reiches zeigt ein Zweipunktregler dasselbe Verhalten wie ein stetig wirkender Proportionalregler; insbesondere verschiebt sich die mittlere Regelabweichung zufolge von Störgrössen (z. B. Veränderung des Stellbereiches $X_{a\,max}$). Interessanterweise ist der «Proportionalbereich» nicht durch die gerätetechnischen Eigenschaften bestimmt, sondern durch die Regelstrecke. Schwierige Regelstrecken ($X_{a\,max}\,T_t/T_{cs}$ gross) bedingen bei stetigen Proportionalreglern einen grossen Proportionalbereich, der am Gerät einzustellen ist, damit der Regelvorgang stabil verläuft. Der Zweipunktregler passt sich aber sozusagen selbsttägig dem Schwierigkeitsgrad der Regelaufgabe an.

Soll die durch eine Störung (Veränderung des Stellbereiches $X_{a\,max}$) bewirkte Veränderung der mittleren Regelabweichung $\Delta^0 X_r$ berechnet werden, lautet der Ansatz:

$$\Delta(\Delta^0 X_r) = \frac{\partial\,\Delta^0 X_r}{\partial\,X_{a\,max}}\,\Delta X_{a\,max}$$

Es ist nicht möglich, die Lösung dieser Gleichung auf eine einigermassen übersichtliche Form zu bringen. Hingegen gibt eine graphische Näherungsmethode eine praktische Formel, die leicht den speziellen Anwendungsfällen angepasst werden kann.

Aus den Kurven für $\Delta^0 X_r^*$ wird jene ausgewählt, die einem konkreten Anwendungsfall entspricht, und in Verlängerung des linearen Mittelteiles wird auf der Ordinate eine fiktive maximale mittlere Regelabweichung $\Delta^0 X_{r\,max}^*$ abgeschnitten (Fig. 4).

Im Bereich zwischen $x_{d\,min}$ und $x_{d\,max}$, der den linearen Kurventeil begrenzt, gilt dann:

$$\Delta^0 X_r^* = \Delta^0 X_{r\,max}\,(1 - 2\,x_d^*)$$

Mit Hilfe dieser graphisch gewonnenen Hilfsgleichung mit beschränktem Geltungsbereich, kann der zu Beginn gemachte Ansatz zu Ende geführt werden:

$$\Delta(\Delta^0 X_r) = \frac{\partial\,\Delta^0 X}{\partial\,X_{a\,max}}\,\Delta X_{a\,max} = 2\,\Delta^0 X_r\,\frac{x_d}{X_{a\,max}}\cdot\Delta X_{a\,max}$$

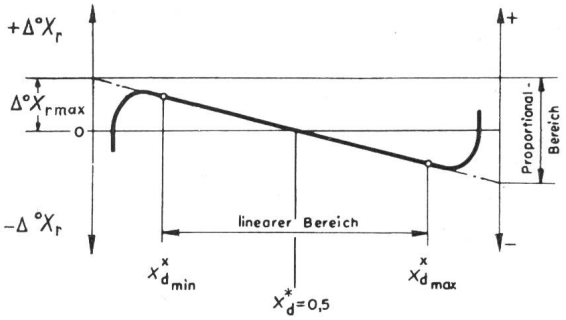

Fig. 4

Graphische Ermittlung des «Proportionalbereiches» eines Zweipunktreglers unter gegebenen Betriebsbedingungen

$\Delta^\circ X_r$ bleibende mittlere Regelabweichung; $\Delta^\circ X_{r\,max}$ Maximalwert von $\Delta^\circ X_r$; $x^*_{d\,min}$ min. Einstellwert des Proportionsbereiches $x^*_{d\,max}$ max. Einstellwert des Proportionsbereiches; x^*_d Einstellzeit

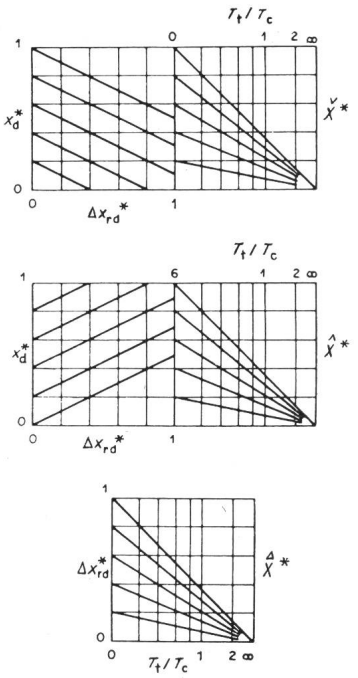

Fig. 5
Diagramm zur Bestimmung der Extremwerte und der Schwingungsweite einer Regelschwankung aus relativem Einstellwert, Totzeitverhältnis und auf den maximalen Stellbereich bezogenen Schaltdifferenz

x^*_d Einstellwert; $\hat{X}^*$ Scheitelwert der Regelschwingung; $\check{X}^*$ Sohlenwert der Regelschwingung; $\overset{\triangle}{X}{}^*$ Schwingungsweite

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

Somit wird die aus einer Änderung $\Delta X_{a\ max}$ der Stellgrösse $X_{a\ max}$ resultierende Änderung der mittleren Regelabweichung:

$$\Delta(\Delta^0 X_r) = 2\,\Delta^0 X_r^*{}_{max}\, x_d^*\, \Delta X_{a\ max}$$

Zweipunktregler sollten nur eingesetzt werden, wenn sich der Einstellbereich innerhalb des «Proportionalbereiches» bewegt.

Für kleine Regelschwankungen kann auch die Näherungsformel gemäss Abschnitt 2.2 herangezogen werden. Dann ist:

$$\Delta(\Delta^0 X_r) = \frac{x_d}{X_{a\ max}} \cdot \frac{T_t/T_{cs}}{1 + T_t/T_{cs}}\, \Delta X_{a\ max}$$

2.4 Nomogramm zur Ermittlung der Regelschwankung

Solange es darum geht, die Zusammenhänge zwischen den in einem Regelkreis gegebenen Grössen und der Regelschwankung zu erkennen, leistet die graphische Darstellung in Fig. 3 gute Dienste. Dagegen ist sie weniger für die rasche Lösung konkreter Einzelprobleme geeignet. Deshalb ist es zweckmässig, die Formeln in einem Diagramm darzustellen, das die rechnerische Behandlung wesentlich vereinfacht.

Grundlage des Diagrammes ist die graphische Darstellung der an sich einfachen Formeln für $\check{X}$, $\hat{X}$, $\overset{\triangle}{X}$ (Fig. 5). Jetzt kann in einem Koordinatenkreuz mit $\check{X}^*$ und $\hat{X}^*$ als Ordinaten jeder Punkt mit den zu ermittelnden Werten von $\overset{\triangle}{X}{}^*$, T_E/T_{cs}, T_A/T_{cs}, T_Z/T_{cs} und ε bestimmt werden (Fig. 6). In Berücksichtigung der Bedingung:

$$1 \geqq \hat{X}^* \geqq \check{X}^*$$

wird so ein Dreieck gewonnen, welches das Regelverhalten eines Zweipunktreglers beschreibt (Fig. 7).

Für die Auswertung einer Messung mit den Messwerten ε, $\hat{X}$ und $\check{X}$ ist ausserdem noch ein Dreieck für $\hat{X}/\check{X}$ dargestellt.

Wenn also in dieser Betrachtung von einem «Dreieck» die Rede ist, bedeutet das immer die Gesamtheit aller nur von den beiden Extremwerten $\hat{X}^*$ und $\check{X}^*$ abhängigen Kenngrössen der Regelschwankungen von Zweipunktreglern.

Um die graphische Darstellung nicht unübersichtlich zu machen, wird das Dreieck mit folgenden Kenngrössen gezeichnet:

$$T_Z/T_{cs},\ \varepsilon,\ \hat{X}/\check{X}$$

Alle andern Grössen können leicht und ohne Rechnung ausgemessen werden (Fig. 7).

Zusammengefügt mit Fig. 5 stellt Fig. 7 das eigentliche Diagramm für das Regelverhalten von Zweipunktreglern ohne Rückführung und ohne Messverzögerung dar.

2.5 Hinweise für die Arbeit mit dem «Dreieck»

Eine gegebene Anordnung mit:

T_{cs}, T_{ts}, $X_{a\ max}$ (Kenngrössen der Regelstrecke);
Δx_{rd}, x_d (Kenngrösse von Regler und Einstellung)

erhält im Dreieck eine «Kennlinie für Zweipunktregler im Regelkreis», die mit der Geraden für die Regelschwankung $\overset{\triangle}{X}{}^*$, die ja konstant bleibt, identisch ist. Auf der Kennlinie werden die Punkte für x_d^* eingetragen, beispielsweise in Abständen von 0,1. Nun sind für jeden Einstellwert alle Kenngrössen der jeweils zu erwartenden Regelschwankung einschliesslich der mittleren Regelabweichung direkt ablesbar (Fig. 8).

Beispiel:

$T_{cs} = 10$ min $\quad T_{ts}/T_{cs} = 0{,}5$
$T_{ts} = 5$ min

$X_a = 5^0$C $\quad \Delta x_{rd}^* = 0{,}28$
$\Delta x_{rd} = 1{,}4$

x_d^*	$\check{X}_r^*$	$\hat{X}_r^*$	$\overset{\triangle}{X}_r^*$	T_Z/T_{cs}	ε	$\Delta^0 X_r^*$
0,14	0	0,56	0,56	0	0	—0,14
0,2	0,04	0,6		3,75	0,23	+0,03
0,3	0,1	0,66		2,9	0,34	+0,04
0,4	0,16	0,72		2,65	0,42	+0,02
0,5	0,22	0,78		2,55	0,5	0,00
0,6	0,28	0,84		2,65	0,58	—0,02
0,7	0,34	0,9		2,9	0,66	—0,04
0,8	0,4	0,96		3,75	0,77	—0,03
0,86	0,44	1,0	0,56		1,0	+0,14

Falls noch abgeklärt werden muss, in welchem Bereich von x_d der Regler sich als Proportionalregler verhält, ist das Diagramm $\Delta^0 X_r^* = F(x_d^*)$ aufzuzeichnen (Fig. 9).

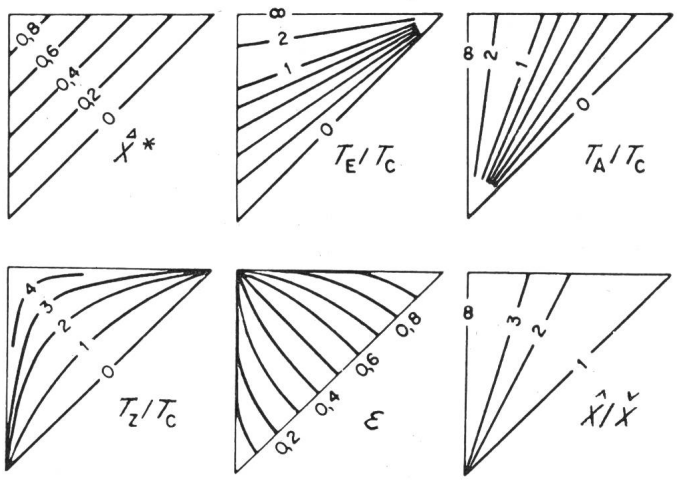

Fig. 6
Dreieck mi tden Extremwerten der Schwingung als Ordinaten und den übrigen Kennzahlen der Regelschwankung als Koten

T_E Einschaltzeit; T_c Zeitkonstante; T_A Ausschaltzeit; T_Z Zyklusdauer; $\hat{X}$ Scheitelwert der Regelschwingung; $\check{X}$ Sohlenwert der Regelschwingung; $\overset{\triangle}{X}{}^*$ Schwingungsweite; ε Einschaltverhältnis

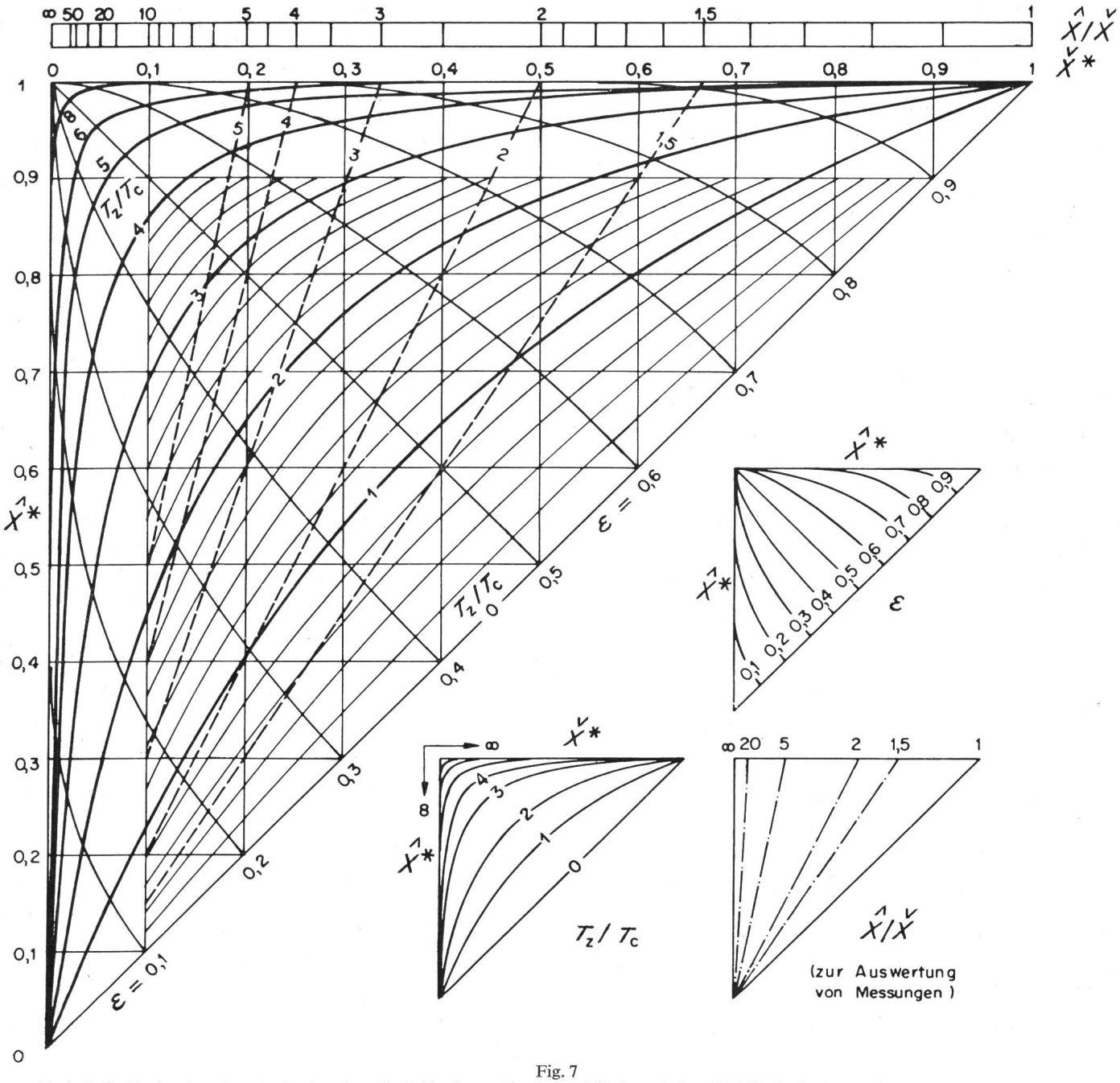

Fig. 7

Dreieck für Zweipunktregler mit den Angaben für Zyklusdauer, Einschaltverhältnis und dem Verhältnis der Extremwerte der Regelschwankung

$\hat{X}^*$ Scheitelwert der Regelschwingung; $\check{X}^*$ Sohlenwert der Regelschwingung

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

3. Das Regelverhalten eines Zweipunktreglers ohne Rückführung, mit Messverzögerung in einer Regelstrecke mit Totzeit und Ausgleich

In der Einleitung wurde auf die Bedeutung der Messverzögerung hingewiesen: Ein Messwert weicht vom tatsächlichen Wert ab; der gemessene Verlauf einer Übergangsfunktion muss korrigiert werden; Regelschwankungen werden durch Trägheit der Messelemente gedämpft usw. Um die Messverzögerung in die näherungsweise Berechnung einer Regelschwankung einbeziehen zu können, muss vorerst kurz das Zeitverhalten von Fühlern diskutiert werden.

3.1 Die Übergangsfunktion von Temperaturfühlern

Wenn ein Temperaturfühler einer plötzlichen Temperaturänderung ausgesetzt wird, folgt seine Anzeige definitionsgemäss mit der Übergangsfunktion dem Temperatursprung nach; die Messung ist verzögert. Der Vergleich einer so ausgemessenen Übergangsfunktion mit dem theoretischen exponentiellen Verlauf e^{-t/T_c} lässt grosse Abweichungen erkennen, so dass es zunächst fraglich scheint, ob das Zeitverhalten eines Temperaturfühlers mit einer e-Funktion genügend genau beschrieben wird. Diese Frage kann an einer Modellbetrachtung diskutiert werden. Als Modell seien 4 Rundstäbe gewählt:

Glasstab	Durchmesser: 5 mm
Messingstab	Durchmesser: 5 mm
Messingstab	Durchmesser: 20 mm
Keramikstab	Durchmesser: 20 mm

Diese Stäbe seien solange auf 80 °C erwärmt, bis ihre Temperatur vollkommen homogen ist. Dann werden sie auf 20 °C abgekühlt, indem sie der Reihe nach in stehendes Wasser, bewegte Luft ($v \approx 7$ m/s) und ruhende Luft eingetaucht werden. Während des Abkühlvorganges wird die Temperatur an den

Oberflächen und den Mittelachsen beobachtet. Die Oberflächen entsprechen als Modell einem Fühler, dessen temperaturempfindliches Element an der Oberfläche angeordnet ist (z. B. Widerstandsdraht auf Glaskolben), während die Achstemperaturen modellmässig mit Fühlern im Schutzrohr korrespondieren. Diese Übergangsfunktionen können mit den e-Kurven aus der leicht zu berechnenden Zeitkonstante $T_c = Gc/F\alpha$ verglichen werden [Gc Speicherwärme, $A\alpha$ Fläche], und dann ist auch eine Bewertung möglich, mit welchem Fehler eine der gemessenen Kurve angeglichene e-Funktion behaftet ist.

Aus den in Fig. 10 dargestellten Übergangsfunktionen können vorerst einige allgemeine Folgerungen gezogen werden:

a) Der Unterschied zwischen der Übergangsfunktion der Oberfläche und der Achse eines zylindrischen Stabes ist umso grösser, je grösser die Wärmeübergangszahl α und je kleiner die Wärmeleitfähigkeit des Fühlerwerkstoffes ist. Bei kleinen Wärmeübergangszahlen und/oder grosser Wärmeleitfähigkeit verschwindet der Unterschied praktisch vollständig.

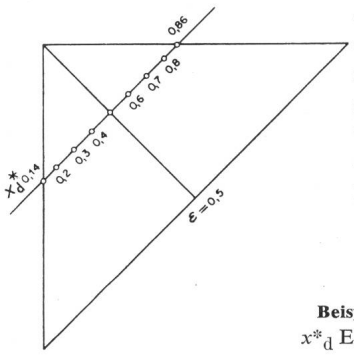

Fig. 8
Beispiel einer Kennlinie im «Dreieck»
x^*_d Einstellwert; ε Einschaltverhältnis

b) Fühler, deren temperaturempfindliche Organe an der Oberfläche eines Werkstoffes kleiner Wärmeleitfähigkeit (Keramik, Glas) aufgebracht sind, reagieren rascher als metallische Fühler gleicher Dimension.

c) Fühler, deren temperaturempfindliches Organ im Innern eines gut leitenden Werkstoffes (Metallschutzrohr) angebracht ist, reagieren bei hohen Wärmeübergangszahlen rascher als Fühler mit gleich dimensioniertem keramischen Schutzrohr. Dagegen ist bei kleinen Wärmeübergangszahlen der Fühler im Metallschutzrohr langsamer als derjenige im Keramikrohr.

Mit diesen ersten Anhaltspunkten ist die Diskussion über das Zeitverhalten von Temperaturfühlern bei weitem nicht erschöpft. Zur allgemeinen Orientierung mag Tabelle II dienen.

3.2 Ersatz-e-Kurve für Temperaturfühler

In welchem Masse die in Fig. 10 gezeigten typischen Übergangsfunktionen exponentiell verlaufen, ist nicht ohne weiteres sichtbar. Die theoretischen e-Kurven mit den Zeitkonstanten nach Tabelle I entsprechen zwar ungefähr dem Temperaturverlauf an den Oberflächen der Modelle, jedoch scheinen die Achstemperaturen ganz anderen Gesetzmässigkeiten zu gehorchen. Die Verhältnisse können besser überblickt werden, wenn die Übergangsfunktionen in einfach-logarithmischem Netz, in welchem eine e-Funktion als Gerade erscheint, dargestellt werden. Am Beispiel des Glasstabes in bewegter Luft (Fig. 11), das so ausgewertet ist, zeigt sich, dass die Übergangsfunktionen aus mehreren e-Kurven zusammengesetzt sind, und dass in einem verhältnismässig grossen Bereich eine mittlere e-Kurve als Ersatz benützt werden kann (Fig. 12). Da die nach der Näherungsmethode $T_c = G_c/F_\alpha$ berechnete Zeitkonstante (Tabelle III) kaum brauchbar ist, erscheint es am besten, die Eigenzeitkonstante T_{cm} eines Fühlers durch Messung zu bestimmen.

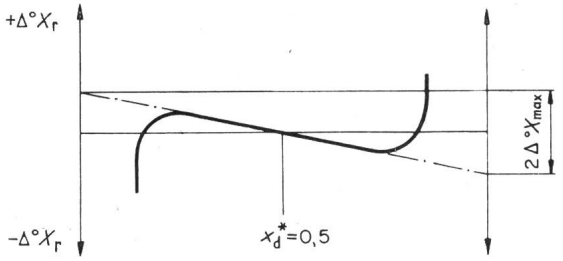

Fig. 9
Bestimmung des Proportionalbereiches
$\Delta^\circ X_{max}$ maximale mittlere Regelabweichung
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 4

Zeitkonstanten (in Sekunden) üblicher Temperaturfühler
Tabelle II

Kühlmittel	Quecksilber-Glasthermometer, Widerstandsthermometer ohne Schutzrohr	Fühler in Metallschutzrohr	Fühler in Keramikschutzrohr
Wasser Flüssige Metalle Salzbäder	2... 6	3... 90	30... 300
Öl	60... 30	15... 450	45... 450
Niederdruckdampf Ruhende Luft (je nach Temperatur)	90...300	150...1500	100...1000

Als Vorbereitung für die folgenden Kapitel und um nach diesem Abstecher in die Temperaturmesstechnik den Anschluss an die Regeltechnik wieder zu finden, kann nun das herausgegriffene Beispiel als Blockschema dargestellt werden (Fig. 13).

Die beiden Temperatursprünge in diesen Schemas sind einfach realisierbar:

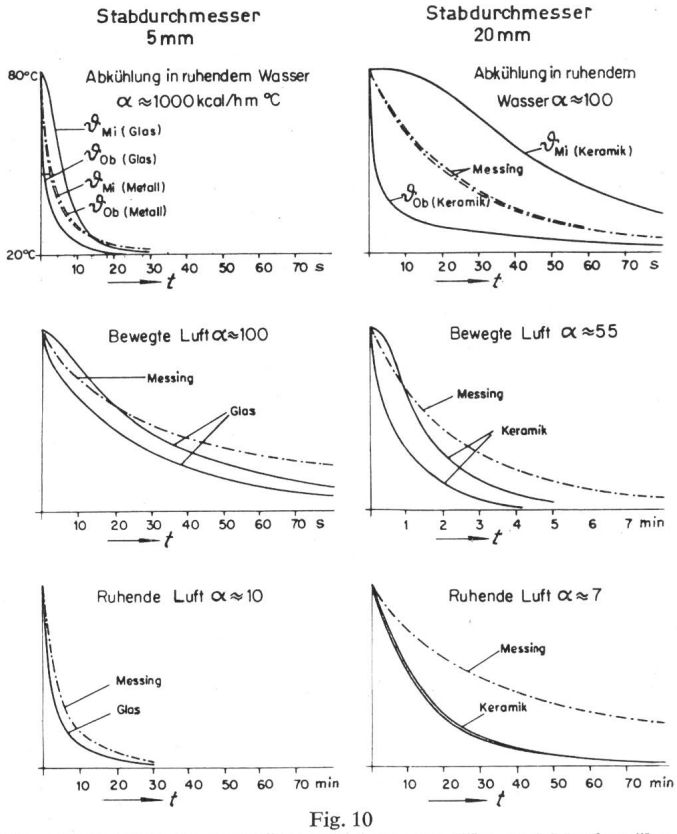

Fig. 10
Übergangsfunktion der Oberfläche und Achse von Glas -und Messingstäben (5 mm Durchmesser) und Keramikstäben (20 mm Durchmesser) bei Abkühlung von 80 auf 20 °C in stehendem Wasser, bewegter (v = 7 m/s) und ruhender Luft
α konvektive Wärmeübergangszahl; ϑ Temperatur; t Zeit

Stoffwerte und thermische Daten der Fühlermodelle

Tabelle III

		Glas	Messing	Keramik
Spezifisches Gewicht	kg/m³	2700	8600	1800
Spezifische Wärme	kcal/kg⁰C	0,2	0,091	0,2
Wärmeleitfähigkeit	kcal/m·Grad·h	0,65	80	0,7
Temperaturleitzahl	m²/h	0,0012	0,01	0,002

Stabdurchmesser mm	5	20
Wärmeübergangszahl (von 80 auf 20⁰C) kcal/m²·Grad·h		
in stehendem Wasser	1000	700
in bewegter Luft (7 m/s)	100	55
in ruhender Luft	10	7

Relative Speicherwärme Gc/F kcal/m²	0,675	0,975	3,9	1,8
Zeitkonstante T_c h				
in stehendem Wasser s	2,4	3,5	20	9
in bewegter Luft (7 m/s) s	24	35	280	120
in ruhender Luft min	4	6	33	15

Temperatursprung des Mediums:
Rasches Eintauchen des Fühlers
Temperatursprung an Fühleroberfläche:
Wahl eines Mediums mit sehr hoher Wärmeübergangszahl (z. B. rasch fliessendes Wasser, bei 1 m/s, $\alpha \approx 10000$)

In dieser Weise betrachtet, stellt also ein Temperaturfühler eine «Serieschaltung» von zwei Verzögerungsgliedern dar, wobei das eine durch die Wärmeübergangsbedingungen und

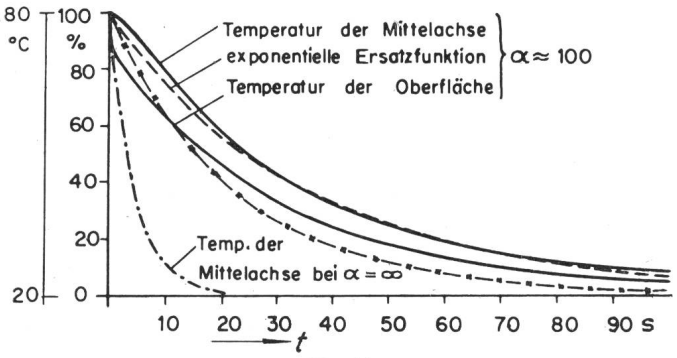

Fig. 11
Gemessene Übergangsfunktion eines Glasstabes im Vergleich zu rechnerisch ermittelten e-Funktionen
Bezeichnungen siehe Fig. 10

das andere durch die Wärmeleitung im Fühler bestimmt ist. Dies bedeutet, dass die Fühlerträgheit den Schwierigkeitsgrad einer Regelaufgabe ganz erheblich steigern kann. Vor der Untersuchung dieser Auswirkungen auf das Regelverhalten von Zweipunktreglern muss nachdrücklich darauf hingewiesen werden, dass eine mittlere Fühlerzeitkonstante, also die Reduktion der komplizierten Fühlerübergangsfunktion auf eine einfache e-Kurve, bestenfalls eine Näherungslösung darstellt und die Genauigkeit dieser Methode oft sehr zu wünschen übrig lässt. Dies umso mehr, als die in Totzeit T_{ts} und Zeitkonstante T_{cs} aufgelöste Übergangsfunktion der Regelstrecke u. U. schon eine beträchtliche Vereinfachung der wirklichen Verhältnisse bedeutet.

3.3 Übergangsfunktion des Regelfühlers in der Regelstrecke

Wird zur Aufnahme der Übergangsfunktion einer Regelstrecke der Regelfühler benützt, so kann nach Abschnitt 3.2

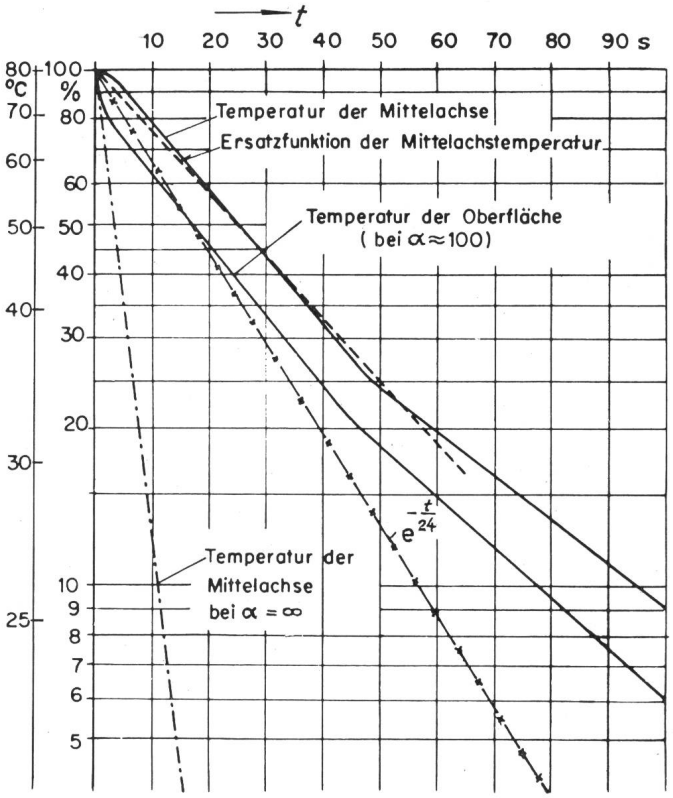

Fig. 12
Darstellung von Übergangsfunktionen in einfach-logarithmischen Koordinaten
Bezeichnungen siehe Fig. 10

oder auch 3.1 eine Ersatzfunktion gebildet werden, deren Kenngrössen als Ersatztotzeit T_{te} und Ersatzzeitkonstante T_{ce} bezeichnet werden. Die Regelschwankung am Fühler kann mit diesen Grössen in bekannter Weise im Dreieck aufgesucht werden. Oft ist es aber nötig, nicht nur den Verlauf der Messgrösse x_m am Fühler, sondern auch der Regelgrösse x_r zu kennen, insbesondere wenn die Extremwerte der Schwankung gewisse durch das geregelte Verfahren bedingte Grenzwerte nicht über- bzw. unterschreiten dürfen. Ebenso kann interessieren, in welchem Masse das Regelverhalten bei Verwendung eines schneller reagierenden Fühlers verbessert würde. Dies wird möglich, wenn die Übergangsfunktion der Regelstrecke (gemessen mit einem sehr trägheitsarmen Fühler) bekannt ist, und die Auswirkung unterschiedlich träger Regelfühler auf diese Übergangsfunktion dargestellt wird. Andererseits müsste aus der mit dem Regelfühler gemessenen Übergangs-

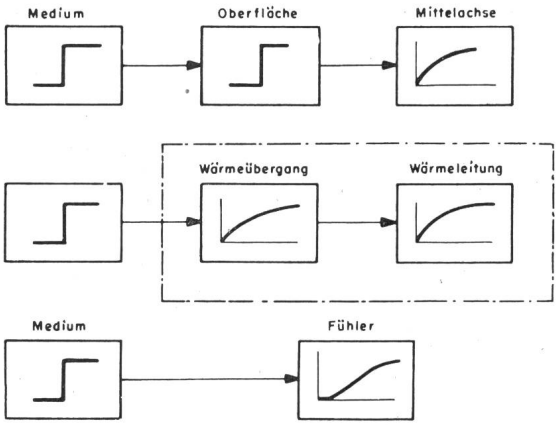

Fig. 13
Blockschaltbild der Übergangsfunktion eines Temperaturfühlers

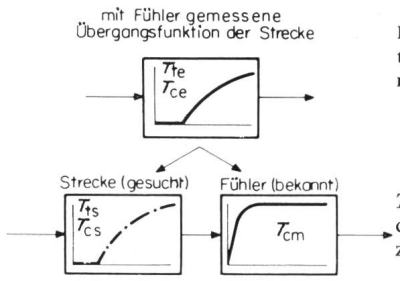

Fig. 14
Ermittlung der Übergangsfunktion der Regelstrecke aus der mit dem Regelfühler bekannter Zeitkonstante gemessenen Funktion
Aufgabe als Blockschema dargestellt
T_{te} Ersatztotzeit; T_{ts} Totzeit der Regelstrecke; T_{ce} Ersatzzeitkonstante; T_{cs} Zeitkonstante der Regelstrecke; T_{cm} Zeitkonstante des Fühlers

funktion diejenige der Regelstrecke zu finden sein, sofern die Eigenzeitkonstante des Fühlers auch bekannt ist. Einige Blockschemas zeigen diese Zusammenhänge (Fig. 14 und Fig. 15).

Die eigentliche Aufgabe besteht darin, aus der Serienschaltung zweier verschiedener exponentiell verlaufender Übergangsfunktionen die Resultierende zu finden. Auf das gleiche Problem wurde auch die Modellbetrachtung bei der Diskussion der Fühler-Übergangsfunktion zurückgeführt, und es ist möglich, mit Hilfe der Fourierschen Differentialgleichung, die auch das Zeitverhalten der Fühlermodelle beschreibt, auf graphischem Weg die gestellte Aufgabe zu lösen.

Gegeben:	Totzeit der Regelstrecke	T_{ts}
	Zeitkonstante der Regelstrecke	T_{cs}
	Zeitkonstante des Fühlers	T_{cm}
Gesucht:	Ersatztotzeit	T_{te}
	Ersatzzeitkonstante	T_{ce}

Lösung: Vorerst wird die Ersatzfunktion der in Serie wirkenden e-Kurven mit den Zeitkonstanten T_{cs} und T_{cm} gesucht: Sie setzt sich zusammen aus der Fühlertotzeit T_{tm} und der Ersatzzeitkonstanten T_{ce}. Die Ersatztotzeit T_{te} ist durch die Summe der Streckentotzeit T_{ts} und der Fühlerersatztotzeit T_{tm} gebildet.

1. Funktion: $$\frac{T_{cs}}{T_{ce}} = F_1\left(\frac{T_{cm}}{T_{cs}}\right)$$

2. Funktion: $$\frac{T_{tm}}{T_{ce}} = F_2\left(\frac{T_{cm}}{T_{cs}}\right)$$

Beide Funktionen sind in Fig. 16, rechts, aufgetragen. Mit Hilfe dieser Diagramme ist jetzt der Fall nach Fig. 15 lösbar.

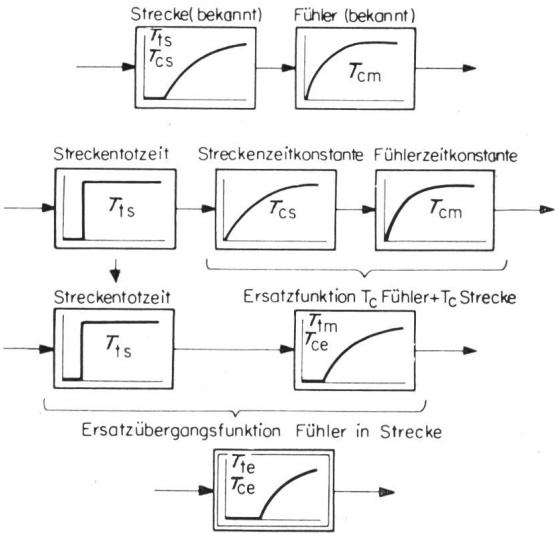

Fig. 15
Rechnerische Ermittlung der Ersatzübergangsfunktion aus Regelstrecke und Fühler
Aufgabe als Blockschema dargestellt
Bezeichnungen siehe Fig. 14

Die Lösung des Falles nach Fig. 14 ist darin schon enthalten, wird aber etwas vereinfacht, wenn noch die 3. Funktion:

$$\frac{T_{cm}}{T_{ce}} = \frac{T_{cm}}{T_{cs}} F_1\left(\frac{T_{cm}}{T_{cs}}\right)$$

eingezeichnet wird.

Rechenbeispiele: Fall nach Fig. 15:

Regelstrecke $T_{ts} = 4$ $T_{cs} = 20$ Fühler $T_{cm} = 10$

$$T_{ts}/T_{cs} = 0{,}2$$

$$\frac{T_{cm}}{T_{cs}} = 0{,}5 \text{ ergibt } \frac{T_{cs}}{T_{ce}} = 0{,}8 \qquad T_{ce} = \frac{T_{cs}}{0{,}8} = 25$$

$$\frac{T_{cm}}{T_{cs}} = 0{,}5 \text{ ergibt } \frac{T_{tm}}{T_{ce}} = 0{,}24 \qquad T_{tm} = T_{ce} \cdot 0{,}24 = 6$$

$$T_{te} = T_{ts} + T_{tm} = 4 + 6 = 10$$

$$\frac{T_{te}}{T_{cs}} = 0{,}4$$

oder auch

$$\frac{T_{te}}{T_{ce}} = \frac{T_{ts}}{T_{cs}} \cdot \frac{T_{cs}}{T_{ce}} + \frac{T_{tm}}{T_{ce}} = 0{,}2 \cdot 0{,}8 + 0{,}24 = 0{,}4$$

Fall nach Fig. 14:

Mit Regelfühler gemessene Übergangsfunktion: Fühler

$T_{te} = 10$ $T_{ce} = 25$ $T_{cm} = 10$

$$\frac{T_{cm}}{T_{ce}} = 0{,}4 \text{ ergibt}$$

$$\frac{T_{cm}}{T_{cs}} = 0{,}5 \qquad T_{cs} = \frac{T_{cm}}{0{,}5} = 20$$

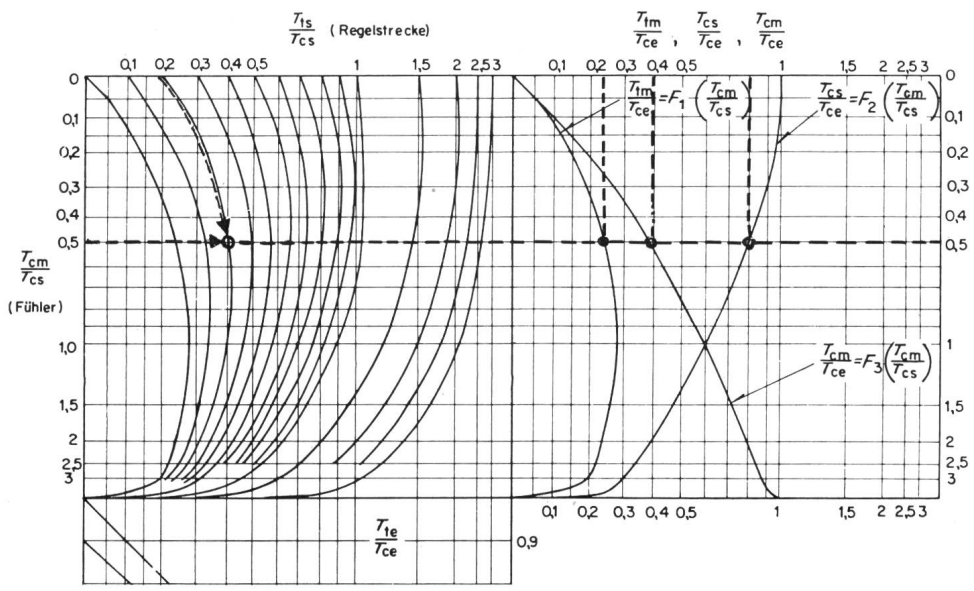

Fig. 16
Diagramm zur Ermittlung der Kennzahlen einer Ersatzübergangsfunktion für Regelstrecke und Messfühler
T_{tm} durch Fühlerzeitkonstante bedingter Totzeitanteil der Ersatzfunktion ($T_{te} = T_{ts} + T_{tm}$)
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 14

$$\frac{T_{cm}}{T_{cs}} = \frac{10}{20} = 0{,}5 \text{ ergibt } \frac{T_{tm}}{T_{ce}} = 0{,}24 \quad T_{tm} = 0{,}24 \cdot 25 = 6$$

$$T_{ts} = T_{te} - T_{tm} = 10 - 6 = 4$$

3.4 Ergänzung des Nomogrammes zur Bestimmung der Regelschwankung bei Berücksichtigung der Messverzögerung

Die Ersatzübergangsfunktion des Regelfühlers in der Regelstrecke liefert gleichartige Kennwerte wie eine Ersatzfunktion der Regelstrecke ohne Messverzögerung. Das Diagramm zur Bestimmung der Extremwerte (Fig. 5) kann also direkt verwendet werden. Es ist aber praktisch, den «Zeiteingang» T_t/T_c des Diagrammes so zu erweitern, dass je nach Aufgabe die Kennzahlen der Regelstrecke und des Fühlers oder der Übergangsfunktion am Fühler benützt werden können. Dies ist möglich, wenn folgende Funktion graphisch dargestellt wird:

$$\frac{T_{te}}{T_{ce}} = \frac{T_{ts}}{T_{cs}} \cdot F_1\left(\frac{T_{cm}}{T_{cs}}\right) + F_2\left(\frac{T_{cm}}{T_{cs}}\right) \qquad \text{(Fig. 17)}$$

3.5 Einfluss der Fühlerträgheit auf die Regelschwankung

Der Regelvorgang bei Zweipunktreglern wird durch die zeitliche Folge der vom Regler ausgelösten Schaltimpulse bestimmt. Der Schaltzustand des Reglers ist jedoch bestimmt durch den von seinem Fühler gemessenen Wert x_m einerseits und dem eingestellten Wert x_d andererseits. Mit den als bekannt vorausgesetzten Daten:

a) Regelstrecke: Stellbereich $X_{a\,max}$
Totzeit T_t
Zeitkonstante T_{cs}

b) Regler: Schaltdifferenz Δx_{rd}
Messfühler-Zeitkonstante T_{cm}

c) Einstellwert: x_d

ergibt sich ein periodischer Verlauf der Regelgrösse x_r, charakterisiert durch die Schwankung $\hat{X}$, die Zyklusdauer T_Z und das Einschaltverhältnis ε. Die Schwingung der Messgrösse x_m verläuft gedämpft und phasenverschoben. Zwischen den beiden Schwingungen besteht eine doppelte Wechselwirkung: Die

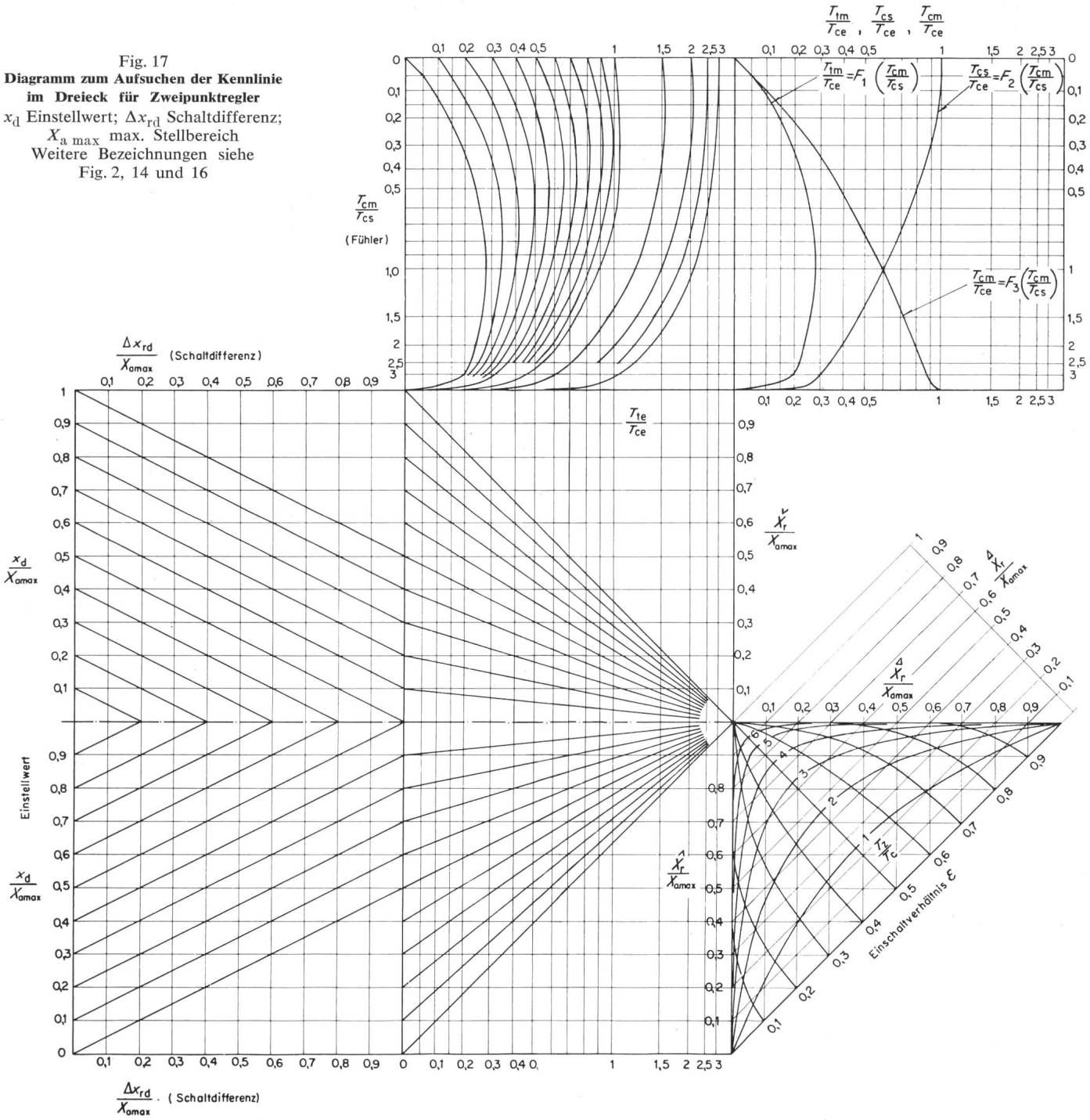

Fig. 17
Diagramm zum Aufsuchen der Kennlinie im Dreieck für Zweipunktregler
x_d Einstellwert; Δx_{rd} Schaltdifferenz; $X_{a\,max}$ max. Stellbereich
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 2, 14 und 16

Regelschwankung von x_r bestimmt den gedämpften Verlauf von x_m, während x_m die Schaltzyklen erzeugt, welche für x_r massgebend sind. Ein solcher Vorgang ist in Fig. 18 dargestellt.

In ausgeschaltetem Zustand strebt die Regelgrösse x_r nach einer Ausgleichskurve mit der Zeitkonstanten T_{cs} ihrem unteren Beharrungswert $x_r = 0$ zu. Die Messgrösse x_m folgt entsprechend der Fühlerzeitkonstanten T_{cm} der Regelgrösse verzögert nach. Im Punkt *1*, der durch den Einstellwert x_d und die Schaltdifferenz Δx_{rd} gegeben ist, wäre x_r soweit abgesunken, dass der Regler einschalten müsste. Der Schaltvorgang wird aber erst vollzogen, wenn die Messgrösse x_m die Schaltdifferenz ebenfalls durchlaufen hat und bei Punkt *2*, dem unteren Schaltpunkt, angelangt ist. Während der Streckentotzeit T_{ts} ist der neue Schaltzustand noch nicht wirksam, so dass x_r und x_m weiter abnehmen. Erst in Punkt *3*, dem Sohlenwert der Grösse x_r, beginnt die Regelgrösse wieder anzusteigen und nach einer scheinbaren «Ersatz-Totzeit» T_{te} erreicht auch die Messgrösse x_m ihren Minimalwert in Punkt *4*. Anschliessend erfolgt der Anstieg von x_r und x_m wieder nach den respektiven Ausgleichskurven und der Ausschaltvorgang geht analog über die Punkte *5—6—7—8* vor sich. Wird zur Vereinfachung des Problemes die Übergangsfunktion des Fühlers mit der Eigenzeitkonstanten T_{cm} und der Streckenzeitkonstanten T_{cs} als Anordnung mit Ersatztotzeit T_{te} und Ersatzzeitkonstanten T_{ce} betrachtet, ergibt sich eine unstetig verlaufende fiktive «Leitschwingung» aus der die wirkliche Schwankung anschaulich durch Abrundung der Ecken gewonnen werden kann.

Für die Regelung ist die Übergangsfunktion des Fühlers in der Regelstrecke massgebend, die zusammen mit dem Regler (Schaltdifferenz) für jeden Einstellwert *eine* Zyklusdauer und *ein* Einschaltverhältnis erzeugt, die an beliebiger Stelle der Anlage gelten, also auch für die Regelgrösse x_r, wobei die Schwingungsweite von x_r durch die Streckenzeitkonstante bestimmt und die Phasenverschiebung mit der Ersatzzeitkonstante T_{tm} identisch ist (Fig. 18).

Wenn hier an die Formel für T_Z und ε erinnert wird, ist erkennbar, dass bei bekannten Übergangsfunktionen des Fühlers und der Strecke, aus der Schwingung am Fühler die Schwingung der Regelgrösse berechnet werden kann:

Einschalt- und Ausschaltzeit werden mit Hilfe des Dreiecks unter Verwendung der Fühler-Übergangsfunktion mit T_{te} und T_{ce} bestimmt, so dass im folgenden Gleichungssystem die Grenzwerte $\hat{X}$ und $\check{X}$ der Regelschwankungen die einzige «Unbekannte» sind:

$$T_A = T_{cs} \cdot \ln(\hat{X}/\check{X}) \quad T_E = T_{cs}\,[(1-\check{X}^*)(1-\hat{X}_r^*)$$

Die Lösung lautet:

$$\hat{X}_r^* = \frac{1-e^{-T_E/T_{cs}}}{1-e^{-T_Z/T_{cs}}} \quad \check{X}_r^* = 1 - \frac{1-e^{-T_A/T_{cs}}}{1-e^{-T_Z/T_{cs}}}$$

mit der Regelschwankung:

$$\overset{\triangle}{X}_r^* = \hat{X}_r^* - \check{X}_r^* = 1 - \frac{e^{-T_E/T_{cs}}(1-e^{-T_A/T_{cs}}) + e^{-T_A/T_{cs}}(1-e^{-T_E/T_{cs}})}{1-e^{-T_Z/T_{cs}}}$$

An Stelle der Rechnung tritt aber vorteilhafter die graphische Lösung im Dreieck: Die Kennlinie der Regelschwankung am Fühler muss um das Verhältnis T_{ce}/T_{cs} versetzt werden, am zweckmässigsten indem die auf T_{cs} bezogene Zyklusdauer bei bei $\varepsilon = 0{,}5$ eingetragen und die Kennlinie parallel verschoben wird, so dass $\hat{X}_r^*$ und $\check{X}_r^*$ direkt ablesbar sind.

3.6 Beispiele

3.6.1 Heizkessel

Regelstrecke:	Maximaler Stellbereich	$X_{a\,max}$	$= 90...70 = 20^0$
	Totzeit	T_{ts}	$= 5$ min
	Zeitkonstante	T_{cs}	$= 10$ min
	Totzeitverhältnis	T_{ts}/T_{cs}	$= 0{,}5$
Regler:	Schaltdifferenz		$= 6\,^0$C
	relative Schaltdifferenz	$\Delta x_{dr}^* = \frac{\Delta x_{rd}}{X_{a\,max}} = \frac{6}{20} = 0{,}3$	
	Fühlerzeitkonstante	T_{cm}	$= 1$ min
		T_{cm}/T_{cs}	$= 0{,}1$

Ersatzübergangsfunktion:

$$\frac{T_{cm}}{T_{cs}} = 0{,}1 \text{ ergibt } \frac{T_{cs}}{T_{ce}} \approx 0{,}99 \triangleq T_{ce} = \frac{10}{0{,}99} = 10{,}1 \text{ min}$$

$$\frac{T_{cm}}{T_{cs}} = 0{,}1 \text{ ergibt } \frac{T_{tm}}{T_{ce}} \approx 0{,}08 \triangleq T_{tm} = 10{,}1 \cdot 0{,}08 \approx 0{,}8 \text{ min}$$

$$T_{te} = T_{ts} + T_{tm} = 5 + 0{,}8 = 5{,}8$$

$$\frac{T_{te}}{T_{ce}} = \frac{5{,}8}{10{,}1} = 0{,}575$$

oder auch

$$\frac{T_{te}}{T_{ce}} = \frac{T_{ts}}{T_{cs}} \cdot 0{,}99 + 0{,}08 = 0{,}495 + 0{,}08 = 0{,}575$$

Kennlinie der Regelschwankung am Fühler:

(berechnet für $x_d^* = 0{,}5$)

$$\hat{X}_m^* = 0{,}8 \quad \check{X}_m^* = 0{,}2 \quad \overset{\triangle}{X}_m^* = 0{,}6 \quad \overset{\triangle}{X}_m = 12\,^0\text{C}$$

$$\frac{T_Z}{T_{ce}} = 2{,}76 \quad T_Z = 28 \text{ min} \quad \frac{T_Z}{T_{cs}} = 2{,}8 \text{ (bei } \varepsilon = 0{,}5)$$

Kennlinie der Regelschwankung der Kesselwassertemperatur:

Die Lage der Kennlinie wird gefunden durch Aufsuchen des Punktes T_Z/T_{cs} auf der Geraden für $\varepsilon = 0{,}5$. Der Unterschied liegt

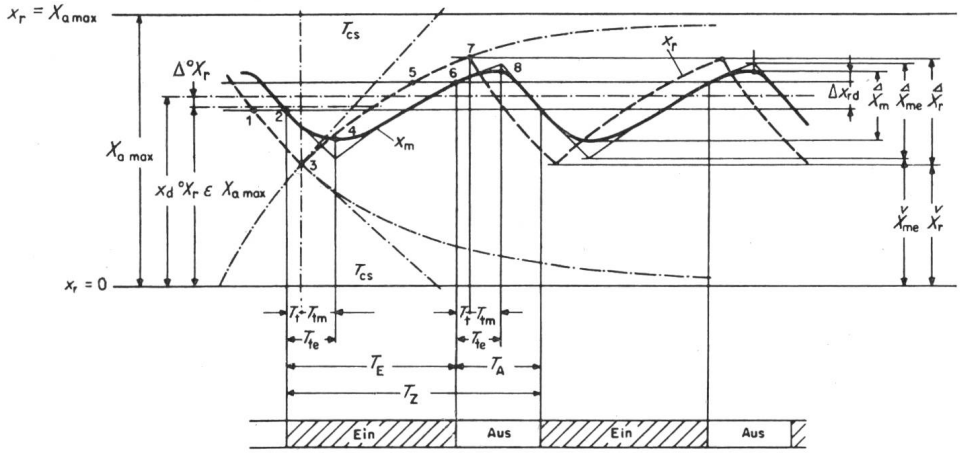

Fig. 18

Darstellung der Regelschwankung einer Regelstrecke mit Zweipunktregler und Messverzögerung

x_d Einstellwert; Δx_{rd} Schaltdifferenz; x_r Regelgrösse; x_m Messwert der Regelgrösse; $X_{a\,max}$ max. Stellbereich; $^\circ X_r$ Mittelwert der Regelgrösse; $\overset{\triangle}{X}_m$ Schwingungsweite (Regelschwankung) der am Fühler gemessenen Grösse; $\overset{\triangle}{X}_{me}$ Schwingungsweite der fiktiven Leitschwingung; $\check{X}_{me}$ Sohlenwert der gemessenen Grösse; $\overset{\triangle}{X}_r$ Schwingungsweite der Regelgrösse; $\hat{X}_r$ Scheitelwert der gemessenen Grösse; T_{cs} Zeitkonstante der Regelstrecke; T_t Totzeit; T_{tm} durch Fühler bedingter Totzeitanteil der Ersatztotzeit; T_{te} Ersatztotzeit; T_E Einschaltzeit; T_A Ausschaltzeit; T_Z Zykluszeit (Impulsabstand)

etwa innerhalb der Rechengenauigkeit, so dass angenommen werden darf:

$$\overset{\triangle}{X}_r \approx \overset{\triangle}{X}_m \approx 12\ ^0C$$

Eine kurze Vergleichsrechnung mit den Kennzahlen der Regelstrecke ohne Messverzögerung ($T_{ts}/T_{cs} = 0{,}5$) zeigt, dass die Fühlerverzögerung des Reglers die Regelschwankung um etwa ½ °C und die kleinstmögliche Zyklusdauer (bei $\varepsilon = 0{,}5$) um ca. 2 min vergrössert.

Interessant ist die Untersuchung, wie sich diese Regelung auf die Temperaturschwankung eines vom Kessel her geheizten Raumes auswirkt. Die Zeitkonstante des Raumes sei zu 40 min angenommen; der max. Stellbereich zu 5 °C. Die Regelschwankung kann durch Einlegen der auf $T_c = 40$ min bezogenen Kennlinie im Dreieck abgeschätzt werden:

$$\text{bei } \varepsilon = 0{,}5 \qquad \frac{T_z}{40} = \frac{28}{40} = 0{,}7$$

Temperaturschwankung im Raum:

$$\overset{\triangle}{X}{}^*_{Raum} = 0{,}176 \triangleq \overset{\triangle}{X}_{Raum} = 0{,}9\ ^0C$$

3.6.2 Lufterhitzer

Ein elektrisch geheizter Lufterhitzer mit den Daten:

maximaler Stellbereich	$X_{a\,max}$	= 40 °C
Totzeit	T_{ts}	= 3 min
Zeitkonstante	T_{cs}	= 10 min
Totzeitverhältnis	T_{ts}/T_{cs}	= 0,3

wird mit einem Regler folgender Daten geregelt:

Schaltdifferenz	Δx_{rd}	= 1 °C
relative Schaltdifferenz	$\Delta x_{rd}/X_{a\,max}$	= 0,025
Fühlerzeitkonstante	T_{cm}	= 0,5 min
	T_{cm}/T_{cs}	= 0,05

Ersatzübergangsfunktion:

$$\frac{T_{cm}}{T_{cs}} = 0{,}05 \text{ ergibt } \frac{T_{cs}}{T_{ce}} \approx 1 \triangleq T_{ce} \approx T_{cs} \approx 10 \text{ min}$$

$$\frac{T_{cm}}{T_{cs}} = 0{,}05 \text{ ergibt } \frac{T_{tm}}{T_{ce}} \approx 0{,}05 \triangleq T_{tm} \approx T_{cm} = 0{,}5 \text{ min}$$

$$T_{te} = T_{ts} + T_{tm} = 3 + 0{,}5 = 3{,}5 \text{ min}$$

$$\frac{T_{te}}{T_{ce}} = \frac{3{,}5}{10} = 0{,}35$$

Die Kennlinien der Schwankungen der Temperaturen am Fühler und der Luft sind angenähert identisch.

Regelschwankung $\overset{\triangle}{X}{}^*_r \approx \overset{\triangle}{X}{}^*_m = 0{,}3 \triangleq \overset{\triangle}{X}_r = 12\ ^0C$

Kleinstmögliche Zyklusdauer (bei $\varepsilon = 0{,}5$):

$$T_{Z\,min} = 12{,}5 \text{ min}$$

In diesem Beispiel zeigt die Vergleichsrechnung, dass die an sich geringe Messverzögerung die minimale Zykluszeit um ca. 1 min und die Regelschwankung um etwa 1 °C vergrössert.

3.6.3 Regelung der Temperatur eines Wohnraumes

Hin und wieder wird versucht, die Temperatur eines Wohnraumes, der z. B. mit Radiatoren beheizt wird, mit einem Zweipunktregler ohne Rückführung zu regeln. Das Ergebnis ist immer eine grosse Regelschwankung und ein sehr langer Schaltzyklus, so dass infolge der Auskühlung der Radiatoren von einer behaglichen Heizung nicht mehr die Rede sein kann. Mit Hilfe der Diagramm-Methode kann nun mühelos das Regelverhalten des mit Schaltdifferenz und Messverzögerung behafteten Reglers mit einem idealisierten Zweipunktregler ($T_{cm} = 0$, $\Delta x_{rd} = 0$) verglichen werden. Es ist offensichtlich, dass Zweipunktregler ohne Rückführung für die Raumtemperaturregelung ungeeignet sind.

Regelstrecke:	Maximaler Stellbereich	$X_{a\,max}$	= 5 °C
	Totzeit	T_{ts}	= 5 min
	Zeitkonstante	T_{cs}	= 40 min
	Totzeitverhältnis	T_{ts}/T_{cs}	= 0,125
Regler:	Schaltdifferenz	Δx_{rd}	= 1,3 °C
	relative Schaltdifferenz	$\Delta x_{rd}/X_{a\,max}$	= 0,26
	Fühlerzeitkonstante	T_{cm}	= 12 min
		T_{cm}/T_{cs}	= 0,3

Ersatzübergangsfunktion:

$$\frac{T_{cm}}{T_{cs}} = 0{,}3 \text{ ergibt } \frac{T_{cs}}{T_{ce}} = 0{,}9 \triangleq T_{ce} = \frac{T_{cs}}{0{,}9} = 44{,}5 \text{ min}$$

$$\frac{T_{cm}}{T_{cs}} = 0{,}3 \text{ ergibt } \frac{T_{tm}}{T_{ce}} = 0{,}19 \triangleq T_{tm} = 44{,}5 \cdot 0{,}19 = 8{,}45 \text{ min}$$

$$T_{te} = T_{ts} + T_{tm} = 5 + 8{,}45 = 13{,}145$$

$$\frac{T_{te}}{T_{ce}} = \frac{13{,}45}{44{,}5} = 0{,}3$$

oder auch

$$\frac{T_{te}}{T_{ce}} = \frac{T_{ts}}{T_{cs}} \cdot 0{,}9 + \frac{T_{tm}}{T_{ce}} = 0{,}125 \cdot 0{,}9 + 0{,}19 = 0{,}3$$

Kennlinie der Regelschwankung am Fühler:

Einstellbereich		$\hat{X}^*$	$\check{X}^*$
minimaler Einstellwert x^*_d min	$= ½\Delta x^*_{rd}$	= 0,13 ≙	0,455 0,0
maximaler Einstellwert x^*_d max	$= 1 \ldots ½\Delta x^*_{rd}$	= 0,87 ≙	1,0 0,545

Die so aufgefundene Kennlinie kann mit einer *linearen* Teilung für x^*_d versehen werden, und zwar zwischen 0,13...0,87.

Die Kennlinie der Regelschwankung der Raumtemperatur ist gegenüber derjenigen des Fühlers mit Bezug auf T_Z/T_c um den Faktor $T_{ce}/T_{cs} = 1{,}11$ verschoben.

Bei $\varepsilon = 0{,}5$, $T_Z/T_{ce} = 1{,}96$ $T_Z/T_{cs} = 1{,}96 \cdot 1{,}11 = 2{,}18$.

Die Regelschwankung der Raumtemperatur beträgt nun:

$$\overset{\triangle}{X}{}^*_r = 0{,}494 \qquad \overset{\triangle}{X}_r = 2{,}5\ ^0C$$

Die minimale Zyklusdauer (bei $\varepsilon = 0{,}5$) wird $T_{Z\,min} = 87$ min

Im Sinne der eingangs gemachten Bemerkung sei auch das Regelverhalten eines «idealen Zweipunktreglers» dargestellt.

Regler	T_{cm} min	Δx_{rd} °C	$\overset{\triangle}{X}_r$ °C	T_z min
Regler mit Δx_{rd} und T_{cm}	12	1,3	2,5	87
	0	1,3	1,8	58
Idealisierter Regler	12	0	1,4	47
	0	0	1	20

Adresse des Autors:
H. Rudolphi, Landis & Gyr AG, 6300 Zug.

Einführung in den Entwurf der Sicherheitsvorschriften für Leuchten

Von *W. Riemenschneider,* Buchs

621.32 : 614.825

Eine Leuchte ist ein Verbraucher von elektrischer Energie, der sie in Wärme und Licht umwandelt. Ihre Handhabung und Verwendung ist somit mit einer gewissen Gefahr verbunden, die nicht offensichtlich ist. Es ist deshalb Aufgabe von Sicherheitsvorschriften, diese Gefahr auf ein Mindestmass zu reduzieren, auch für den in elektrischen Dingen völlig unerfahrenen Benützer.

Die ersten sicherheitstechnischen Anforderungen an Leuchten sind in den Hausinstallationsvorschriften (HV, Publ. 1000 des SEV) zusammengefasst. Diese enthalten aber