Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 46 (1955)

Heft: 14

Artikel: Untersuchungen über die Temperaturabhängigkeit der Induktionszähler

Autor: Tschappu, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060940

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: 08.08.2025

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

46. Jahrgang Nr. 14 Samstag, 9. Juli 1955

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN
DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Untersuchungen über die Temperaturabhängigkeit der Induktionszähler

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 2. Juni 1955, in Zürich,

von *F. Tschappu*, Zug

621.317.785

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der rechnerischen Behandlung der Temperaturabhängigkeit der Induktionszähler. Anhand des Vektordiagrammes werden die Drehmomentgleichungen aufgestellt. Die einzelnen Einflüsse der temperaturabhängigen Bauelemente auf den resultierenden Temperaturfehler werden behandelt. Ein besonderes Kapitel befasst sich mit den Mitteln zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit der Zähleranzeige.

L'auteur s'occupe du calcul de l'influence de la température sur les indications de compteurs à induction. Les équations du couple sont établies à l'aide du diagramme vectoriel. L'influence des différents éléments de la construction sur l'erreur résultante due à la température est examinée. Un chapitre est consacré aux moyens de compenser cette influence.

1. Das Vektordiagramm und Ersatzschema des Induktionszählers

Die innern Verhältnisse des Induktionszählers können am anschaulichsten dargestellt werden durch sein Vektordiagramm und sein Ersatzschema. Zur Erläuterung des Zähleraufbaues dient Fig. 1.

Das Triebsystem besteht aus dem Spannungseisen *1*, dem Stromeisen *6*, welche beide aus gestanzten Dynamoblechlamellen hergestellt sind, und der Triebscheibe *8* aus Aluminium, die in den Triebluftspalt *10* zwischen Spannungs- und Stromeisen hineinragt. Auf dem mittleren Pol *3* des Spannungseisens befindet sich die Spannungsspule *5*, bestehend

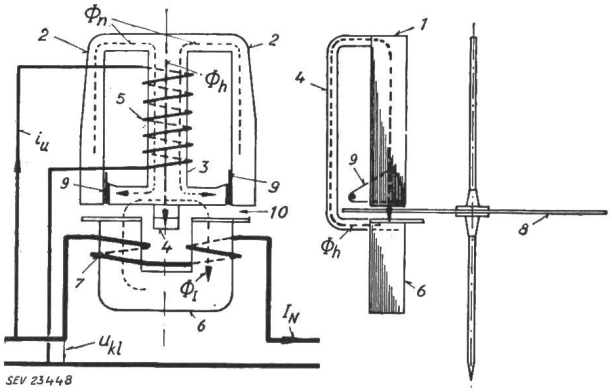

Fig. 1
Prinzipieller Aufbau des Induktionszählers

1 Spannungseisen; *2* magnetischer Nebenschluss im Spannungseisen; *3* Spannungspol; *4* Spannungsgegenpol; *5* Spannungsspule; *6* Stromeisen; *7* Stromspule; *8* Triebscheibe; *9* Phasen-Abgleichflügel; *10* Triebluftspalt; u_{kl} Klemmenspannung; i_u Strom in der Spannungsspule *5*; I_N Netzstrom; Φ_h Spannungstriebfluss; Φ_I Stromtriebfluss; Φ_n Spannungs-Nebenschlussfluss

aus vielen Windungen dünnen Drahtes, die an die Netzspannung U_{kl} angeschaltet wird. Auf den beiden Polen des Stromeisens *6* ist die Stromspule *7* befestigt, bestehend aus wenigen Windungen dicken Drahtes, durch die der Netzstrom I_N fliesst. Zum kompletten Triebsystem gehören ferner noch der Bremsmagnet sowie das Zählwerk, welches die den Zähler durchfliessende Energiemenge registriert. (Diese beiden Elemente sind in Fig. 1 nicht eingezeichnet.)

Der Strom i_u, der die Spannungsspule *5* durchfliesst, erzeugt einen magnetischen Fluss Φ_t im Spannungseisen. Ein Teil Φ_h des gesamten magnetischen Spannungsflusses Φ_t, der *Spannungstriebfluss*, tritt durch den Triebluftspalt und die Triebscheibe und schliesst sich durch den Spannungsgegenpol *4* zurück in das Spannungseisen. Der andere Teil Φ_n des gesamten magnetischen Spannungsflusses Φ_t, der *Spannungsnebenschlussfluss*, durchsetzt die Triebscheibe nicht, sondern fliesst durch die beiden seitlichen Arme *2* des Spannungseisens zurück. Dieser Teil Φ_n liefert keinen Beitrag an das Drehmoment. Der Netzstrom I_N durchfliesst die Stromspule *7* und erzeugt im magnetischen Kreis des Stromeisens den magnetischen Stromtriebfluss Φ_I, der die Triebscheibe durchdringt und sich über den Pol des Spannungseisens zurück durch die Triebscheibe in das Stromeisen schliesst. Vom Spannungstriebfluss Φ_h werden in der Triebscheibe transformatorisch die Wirbelströme i_{2h} und vom Stromtriebfluss Φ_I die Wirbelströme I_2 induziert. Diese Sekundärströme fliessen in der Triebscheibe kreisförmig um den Durchtrittsquerschnitt der magnetischen Triebflüsse. In den seitlichen Luftspalten des Spannungseisens sind drehbar gelagert die Phasen-Abgleichflügel *9* aus Kupfer, mit denen die richtige Phasenlage des Spannungstriebflusses Φ_h eingestellt werden kann.

Beim normalen Wirkverbrauchszähler müssen bei Ohmscher Netzlast die beiden Triebflüsse Φ_h und Φ_I einen Phasenwinkel von 90° miteinander einschliessen.

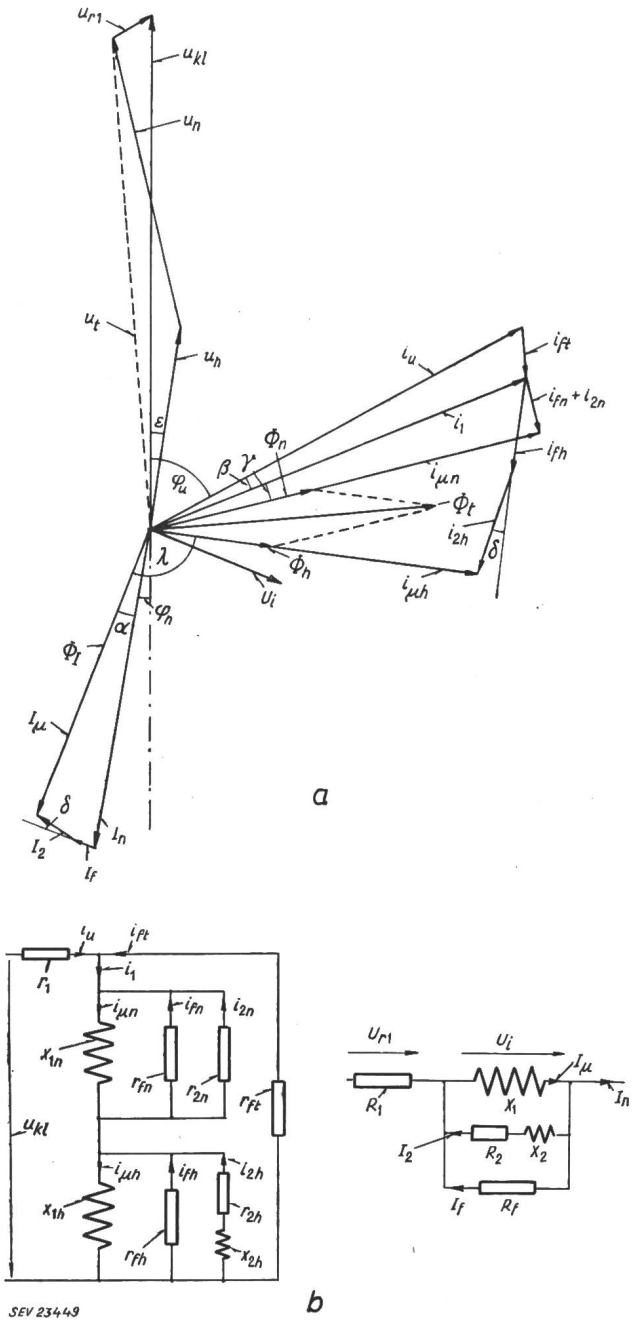

Fig. 2

Vollständiges Vektordiagramm (a) und Ersatzschema (b) des Induktionszählers

links: spannungsseitig; *rechts:* stromseitig

u_{kl} Klemmenspannung = Netzspannung
i_u primärer Strom in der Spannungsspule
i_1 Erregerstrom der magnetischen Flüsse im Spannungseisen
i_{un} Magnetisierungsstrom des Spannungs-Nebenschlussflusses Φ_n
i_{uh} Magnetisierungsstrom des Spannungstriebflusses Φ_h
i_{2n} vom Fluss Φ_n in den Phasen-Abgleichflügeln induzierter Sekundärstrom
i_{2h} vom Spannungstriebfluss Φ_h in der Triebscheibe induzierter Sekundärstrom
i_{fn} Eisenverluststrom, verursacht durch Eisenverluste im Pfade des Spannungs-Nebenschlussflusses Φ_n
i_{fh} Eisenverluststrom, verursacht durch die Eisenverluste im Pfade des Spannungstriebflusses Φ_h
i_{ft} Eisenverluststrom, verursacht durch die Eisenverluste im Pfade des gesamten magnetischen Spannungsflusses Φ_t
u_h vom Spannungstriebfluss induzierte Spannung
u_n vom Spannungsnebenschlussfluss Φ_n induzierte Spannung
u_t vom gesamten Spannungsfluss Φ_t induzierte Spannung
} bezogen auf die Windungszahl der Spannungsspule
r_1 Ohmscher Widerstand der Spannungsspule
r_{2h} Ohmscher Widerstand der Triebscheibe für Ströme i_{2h}
r_{2n} Ohmscher Widerstand der Phasen-Abgleichflügel für die Ströme i_{2n}
x_{2h} Streureaktanz der Triebscheibe für die Ströme i_{2h}
x_{1h} primäre Hauptreaktanz des Spannungstriebflusses Φ_h
x_{1n} primäre Hauptreaktanz des Spannungsnebenschlussflusses Φ_n
I_N Netzstrom
I_2 vom Stromtriebfluss Φ_I in der Triebscheibe induzierter Sekundärstrom
I_f Eisenverluststrom im Pfade des Stromtriebflusses Φ_I
I_u Magnetisierungsstrom des Stromtriebflusses Φ_I
U_i vom Stromtriebfluss Φ_I induzierte Spannung
R_1 Ohmscher Widerstand der Stromspule
R_2 Ohmscher Widerstand der Triebscheibe für Ströme I_2
X_2 Steuerreaktanz der Triebscheibe für die Ströme I_2
X_1 primäre Hauptreaktanz des Stromtriebflusses Φ_I
R_f Eisenverlustwiderstand im Pfade des Stromtriebflusses Φ_I

Die *Verluste im Spannungskreis* des Zählers, die dauernd entstehen, auch wenn keine Netzlast den Zähler durchfliesst, gehen zu Lasten des Versorgungsnetzes und betragen bei einem normalen Wirkverbrauchszähler ca. 0,6...1,1 W. Sie setzen sich zusammen aus:

a) Ohmsche Verluste in der Spannungsspule p_{r1} ca. 25 %
b) Ohmsche Verluste in der Triebscheibe p_{rh} ca. 25 %
c) Ohmsche Verluste im Phasen-Abgleichmittel p_{rn} vernachlässigbar klein
d) Eisenverluste im Spannungseisen p_f ca. 50 %

Die *Verluste im Stromkreis* des Zählers treten erst auf, wenn ein Netzstrom I_N durch die Spule fliesst und gehen zu Lasten des Verbrauchers. Sie setzen sich zusammen aus:

a) Ohmsche Verluste in der Stromspule P_{r1}
b) Ohmsche Verluste in der Triebscheibe P_{r2}
c) Eisenverluste im Stromeisen P_f, vernachlässigbar klein

Die einzelnen Anteile der gesamten Verluste im Stromkreis hängen ab von der Überlastbarkeit des betreffenden Zählers, die das Kupfervolumen der Stromspule vorschreibt.

Die *Eisenverluste* in den Pfaden der magnetischen Flüsse sind Wirkverluste, wie die Ohmschen Verluste von elektrischen Leitern. Wir können daher einen fiktiven Eisenverlustwiderstand r_f einführen, welcher an die induzierte Spannung u gelegt wird. Die Spannung u wird vom magnetischen Fluss Φ in der Wicklung transformatorisch induziert, in dessen Flusspfad die erwähnten Eisenverluste entstehen. Die Eisenverluste p_f können nach folgender Formel berechnet werden:

$$p_f = i_f^2 r_f = u\, i_f = \frac{u^2}{r_f}$$

Die Eisenverluste können also wie gewöhnliche Verluste in stromdurchflossenen Leitern behandelt werden und gehorchen denselben Gesetzen. Das vollständige Vektordiagramm des Induktionszählers und sein Ersatzschema sind in Fig. 2 dargestellt.

Im *Spannungskreis* ergibt die vektorielle Summe der Spannungen u_h, u_n und u_{r1} die Klemmenspannung u_{kl}. Die induzierten Spannungen sind gegenüber den magnetischen Flüssen um 90° in der Phase vorverschoben. Der Ohmsche Spannungsabfall u_{r1} ist in Phase mit dem Strom i_u der Spannungsspule. Den Erregerstrom i_1 im Spannungskreis erhalten wir, indem wir vom Strom i_u den Eisenverluststrom i_{ft} vektoriell subtrahieren. Dieser Eisenverluststrom i_{ft} stellt die Eisenverluste im Kreise des magnetischen Flusses Φ_t (mittlerer Schenkel des Spannungseisens) dar. Er ist als Sekundärstrom gegenüber u_t um 180° in der Phase

verschoben und wird nach folgender Formel berechnet:

$$i_{ft} = \frac{p_{ft}}{u_t}$$

Im Kreise des Spannungstriebflusses Φ_h (Triebscheibe-Spannungsgegenpol) entstehen die Eisenverluste p_{fh} und die durch die Sekundärströme i_{2h} in der Triebscheibe verursachten Ohmschen Verluste p_{rh}. Der Eisenverluststrom i_{fh} ist als Sekundärstrom gegenüber der induzierten Spannung u_h um 180° in der Phase verschoben. Er wird nach folgender Formel berechnet:

$$i_{fh} = \frac{p_{fh}}{u_h}$$

Die Triebscheibe stellt für die Scheibenströme i_{2h} eine Ohmisch-induktive Impedanz dar, deren Ohmsche Komponente r_{2h} die induktive x_{2h} bei weitem übertrifft. Der Scheibenstrom i_{2h} eilt daher als Sekundärstrom gegenüber der induzierten Spannung u_h um einen Phasenwinkel $180° + \delta$ nach, wobei der kleine Winkel δ ein paar Winkelgrade beträgt. Im Kreise des Spannungsnebenschlussflusses Φ_n entstehen die Eisenverluste p_{fn} und die Ohmschen Verluste p_{rn} in den Phasen-Abgleichflügeln, verursacht durch die Sekundärströme i_{2n}. Der Eisenverluststrom $i_{fn} = p_{fn}/u_n$ und der Strom i_{2n} in den Phasen-Abgleichflügeln sind als Sekundärströme gegenüber der induzierten Spannung u_n in der Phase um 180° verschoben.

Die Verhältnisse im Stromkreis sind wesentlich einfacher. Der magnetische Stromtriebfluss Φ_I wird belastet durch den Eisenverluststrom I_f und den Sekundärstrom I_2 in der Triebscheibe. Der Eisenverluststrom I_f ist gegenüber der induzierten Spannung U_i in der Phase um 180° verschoben, wogegen der Scheibenstrom I_2 infolge der kleinen Streureaktanz X_2 der Triebscheibe gegenüber der induzierten Spannung U_i um einen Winkel $180° + \delta$ in der Phase verschoben ist.

2. Entstehung der Antriebs- und Bremsmomente im Induktionszähler

Das Antriebsdrehmoment M_A setzt sich aus 2 Komponenten zusammen:

a) Das Drehmoment M_{I} entsteht durch das Zusammenwirken des Spannungstriebflusses Φ_h mit den vom Stromtriebfluss Φ_I in der Triebscheibe induzierten Strömen I_2 nach folgender Formel:

$$M_{\mathrm{I}} = k_1 \Phi_h I_2 \cdot \cos \sphericalangle (\Phi_h / I_2)$$

k_1 Konstante
$\sphericalangle (\Phi_h / I_2)$ Phasenwinkel zwischen Φ_h und I_2

b) Das Drehmoment M_{II} entsteht durch das Zusammenwirken des Stromtriebflusses Φ_I mit den vom Spannungstriebfluss Φ_h in der Triebscheibe induzierten Strömen i_{2h}, nach folgender Formel:

$$M_{\mathrm{II}} = k_2 \Phi_I i_{2h} \cdot \cos \sphericalangle (\Phi_I / i_{2h})$$

k_2 Konstante
$\sphericalangle (\Phi_I / i_{2h})$ Phasenwinkel zwischen Φ_I und i_{2h}

Das resultierende Antriebsmoment M_A ist die Summe aus M_{I} und M_{II}

$$M_A = k_1 \Phi_h I_2 \cdot \cos \sphericalangle (\Phi_h / I_2) + \\ + k_2 \Phi_I i_{2h} \cdot \cos \sphericalangle (\Phi_I / i_{2h})$$

Anhand des Vektordiagrammes in Fig. 2*a* können wir für die Phasenwinkel zwischen den magnetischen Triebflüssen und Scheibenströmen folgende Ausdrücke einsetzen:

$$(\Phi_h / I_2) = (\varphi_N + \alpha - \varepsilon + \delta)$$
$$(\Phi_I / i_{2h}) = (\varphi_N + \alpha - \varepsilon - \delta)$$

Im geeichten Zustand müssen bei Ohmscher Last die beiden Triebflüsse Φ_h und Φ_I einen Phasenwinkel von 90° miteinander einschliessen. Der Winkel α muss also in diesem Zustand gleich dem Winkel ε sein, so dass die Formel für das resultierende Antriebsdrehmoment M_A lautet:

$$M_A = k_1 \Phi_h I_2 \cdot \cos (\varphi_N + \delta) + k_2 \Phi_I i_{2h} \cdot \cos (\varphi_N - \delta)$$

Für unsere Untersuchungen über die Temperaturabhängigkeit der Zähleranzeige können wir die kleine Scheibeninduktivität gegenüber ihrem Ohmschen Widerstand vernachlässigen, da sie nicht temperaturabhängig ist. Der Winkel δ wird daher gleich Null. Die Formel für das resultierende Antriebsmoment M_A reduziert sich auf:

$$M_A = (k_1 \Phi_h I_2 + k_2 \Phi_I i_{2h}) \cos \varphi_N$$

Das Bremsmoment M_B wird durch einen permanenten Magneten, den Bremsmagneten erzeugt, dessen magnetischer Fluss Φ_B die Triebscheibe durchsetzt. Er induziert darin eine EMK der Rotation, welche proportional der Drehzahl der Scheibe ist. Diese EMK verursacht in der Triebscheibe Wirbelströme, die bremsend auf das drehbare System wirken. Das Bremsmoment M_B kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$M_B = k_B \Phi_B^2 n \frac{1}{R_B}$$

k_B Konstante
n Drehzahl der Scheibe
R_B Ohmscher Widerstand der Pfade der Bremsströme

Die Drehzahl der Triebscheibe stellt sich im Beharrungszustand so ein, dass das Antriebsmoment M_A betragsmässig gleich dem Bremsmoment M_B wird.

3. Ursache der Temperaturabhängigkeit der Zähleranzeige

Für den Aufbau der Induktionszähler werden zum Teil Materialien verwendet, deren elektrische und magnetische Eigenschaften von der Temperatur abhängig sind. Es sind dies in erster Linie die Triebscheibe aus Aluminium, die Spannungs- und Stromspule aus Kupfer, das aktive Eisen, dessen Verluste bei konstanter Induktion temperaturabhängig sind, ferner der Bremsmagnet, dessen magnetischer Fluss ebenfalls eine Funktion der Temperatur ist.

Als Baustoff für die Triebscheibe kommt nur Aluminium in Frage, da dieses Material unter allen elektrischen Leitern die grösste elektrische Leitfähigkeit pro Gewichtseinheit besitzt. Diese ist jedoch in starkem Masse von der Temperatur ab-

hängig. Da ausser den beiden magnetischen Triebflüssen Φ_h und Φ_I auch der Bremsfluss Φ_B auf dieselbe Triebscheibe wirkt, wird der Einfluss dieser auf die Temperaturabhängigkeit der Zähleranzeige vermindert. Er besteht nur durch die von der Temperatur abhängige Belastung der Triebflüsse durch die Scheibenströme, die nebst dem Betrage der Triebflüsse hauptsächlich deren Phasenlage beeinflussen.

Als Material für die Spannungs- und Stromspule wird normalerweise Kupfer verwendet, dessen elektrische Leitfähigkeit ebenfalls von der Temperatur abhängt. Das Material der Stromspule hat bei den gewöhnlichen Wirkverbrauchszählern keinen Einfluss auf die Temperaturabhängigkeit der Zähleranzeige, da der Strom I_N durch die Belastung im Netz dem Zähler aufgezwungen wird. Im Spannungskreis sind die Verhältnisse anders; die Spannungsspule liegt an der Netzspannung u_{kl} und ihr Strom i_u hängt ab vom Ohmschen Widerstand r_1 des Leitermaterials.

Die das Antriebs- und Bremsmoment bildenden Ausdrücke sind Funktionen von temperaturabhängigen Grössen. Ändert sich die Temperatur von t_0 um t auf t' °C, so ändern folgende Grössen:

$$\Phi_h \rightarrow \Phi_h' = \Phi_h + \triangle \Phi_h$$
$$I_2 \rightarrow I_2' = I_2 + \triangle I_2$$
$$\Phi_I \rightarrow \Phi_I' = \Phi_I + \triangle \Phi_I$$
$$i_{2h} \rightarrow i_{2h}' = i_{2h} + \triangle i_{2h}$$
$$\alpha \rightarrow \alpha' = \alpha + \triangle \alpha$$
$$\varepsilon \rightarrow \varepsilon' = \varepsilon + \triangle \varepsilon$$
$$M_A \rightarrow M_A' = M_A + \triangle M_A$$
$$M_B \rightarrow M_B' = M_B + \triangle M_B$$

Bei der Temperatur t' °C beträgt das Antriebsmoment M_A':

$$M_A' = [k_1 (\Phi_h + \triangle \Phi_h) \cdot (I_2 + \triangle I_2) + k_2 (\Phi_I + \triangle \Phi_I) \cdot (i_{2h} + \triangle i_{2h})] \cos (\varphi_N + \triangle \alpha - \triangle \varepsilon)$$

Den Ausdruck $\cos (\varphi_N + \triangle \alpha - \triangle \varepsilon)$ können wir umwandeln in:

$$\cos \varphi_N \cdot \cos (\triangle \alpha - \triangle \varepsilon) - \sin \varphi_N \cdot \sin (\triangle \alpha - \triangle \varepsilon)$$

Für kleine Werte von $(\triangle \alpha - \triangle \varepsilon)$ ist:

$\cos (\triangle \alpha - \triangle \varepsilon) \approx 1$ und $\sin (\triangle \alpha - \triangle \varepsilon) \approx (\triangle \alpha - \triangle \varepsilon)$;

damit wird:

$$\cos (\varphi_N + \triangle \alpha - \triangle \varepsilon) = \cos \varphi_N [1 - \operatorname{tg} \varphi_N (\triangle \alpha - \triangle \varepsilon)]$$

Für die Scheibenströme i_{2h} und I_2 setzen wir folgende Ausdrücke ein:

$$i_{2h} = k_3 \Phi_h / r_{2h} \qquad I_2 = k_4 \Phi_I / R_2$$

Ändern sich die Triebflüsse um den kleinen Betrag $\triangle \Phi_h$, bzw. $\triangle \Phi_I$ und die Widerstände der Triebscheibe um $\triangle r_{2h}$, bzw. $\triangle R_2$, so beträgt die relative Änderung der Scheibenströme i_{2h}, bzw. I_2:

$$\frac{\triangle i_{2h}}{i_{2h}} = \frac{\triangle \Phi_h}{\Phi_h} - \frac{\triangle r_{2h}}{r_{2h}} \qquad \frac{\triangle I_2}{I_2} = \frac{\triangle \Phi_I}{\Phi_I} - \frac{\triangle R_2}{R_2}$$

Die Ausdrücke $\triangle r_{2h}/r_{2h}$ und $\triangle R_2/R_2$ können wir einander gleichsetzen, da die Scheibenströme i_{2h} und I_2 in derselben Triebscheibe fliessen. Folglich sind auch die relativen Änderungen der Ohmschen Widerstände ihrer Pfade in der Triebscheibe gleich gross.

Unter Berücksichtigung der obigen Beziehungen können wir für die relative Änderung des Antriebsmomentes, die durch eine Änderung der Raumtemperatur hervorgerufen wird, folgenden Ausdruck setzen:

$$\frac{\triangle M_A}{M_A} = \frac{\triangle \Phi_h}{\Phi_h} + \frac{\triangle \Phi_I}{\Phi_I} - \frac{\triangle R_s}{R_s} - \operatorname{tg} \varphi (\triangle \alpha - \triangle \varepsilon)$$

$$\frac{\triangle R_s}{R_s} = \frac{\triangle r_{2h}}{r_{2h}} = \frac{\triangle R_2}{R_2}$$

Diese Formel gilt streng genau nur für unendlich kleine Änderungen der Grössen $\Phi_h, \Phi_I, R_s, \alpha$ und ε. Bei den praktisch vorkommenden Temperaturschwankungen ändern diese Grössen ihre Werte in der Grössenordnung von Prozenten, so dass man obige Formel mit genügender Genauigkeit verwerten kann.

Bei der Temperatur t' °C beträgt das Bremsmoment M_B':

$$M_B' = k_B \Phi_B'^2 \cdot n \frac{1}{R_B'} = k_B (\Phi_B + \triangle \Phi_B)^2 \cdot n \frac{1}{R_B + \triangle R_B}$$

Für die relative Änderung des Bremsmomentes können wir folgenden Ausdruck setzen:

$$\frac{\triangle M_B}{M_B} = +2 \frac{\triangle \Phi_B}{\Phi_B} - \frac{\triangle R_B}{R_B} = +2 \frac{\triangle \Phi_B}{\Phi_B} - \frac{\triangle R_s}{R_s}$$

Den Temperaturfehler der Zähleranzeige f_t berechnet man aus der Differenz der relativen Änderungen von Antriebs- und Bremsmoment, die durch eine Temperaturveränderung hervorgerufen wird:

$$f_t = \frac{\triangle M_A}{M_A} - \frac{\triangle M_B}{M_B} = \frac{\triangle \Phi_h}{\Phi_h} + \frac{\triangle \Phi_I}{\Phi_I} - 2 \frac{\triangle \Phi_B}{\Phi_B} - \operatorname{tg} \varphi_N (\triangle \alpha - \triangle \varepsilon)$$

Obige Gleichung zeigt, dass der resultierende Temperaturfehler f_t bei einer bestimmten Temperatur keine Konstante, sondern eine Funktion des Netzphasenwinkels φ_N ist.

Eine Änderung des Drehmomentes kann entstehen, wenn die Beträge der magnetischen Flüsse Φ_h, Φ_I und Φ_B temperaturabhängig sind. Der daraus resultierende Temperaturfehler ist unabhängig vom Netzphasenwinkel φ_N.

Ausserdem kann eine Drehmomentsänderung entstehen, wenn die gegenseitige Phasenlage von Spannungs- und Stromtriebfluss temperaturabhängig wird. Der daraus resultierende Temperaturfehler ist proportional dem $\operatorname{tg} \varphi_N$. Er entsteht also hauptsächlich bei kleinem Leistungsfaktor $\cos \varphi_N$ im Netz. Ändert sich der Zwischenwinkel zwischen Spannungs- und Stromtriebfluss bei einer Netzlast $\cos \varphi_N = 0{,}5$ um 1 Winkelgrad, so entsteht daraus ein Zählerfehler von 3 %.

4. Untersuchungen über den Einfluss der verschiedenen Bauelemente im Zähler auf die Temperaturabhängigkeit der Zähleranzeige

Um auf den resultierenden Temperaturfehler f_t schliessen zu können, müssen die temperaturabhängigen Bauelemente im Zähler und ihre Abhängigkeit von der Temperatur bekannt sein.

a) *Spannungsspule.* Material: Kupfer. Der Temperaturkoeffizient des Ohmschen Widerstandes der Spannungsspule a_{r1} beträgt $+4 \cdot 10^{-3}$ pro °C Temperaturerhöhung.

$$a_{r1} = \frac{\triangle r_1}{r_1} \qquad [1/\text{Grad}]$$

b) *Triebscheibe.* Material: Aluminium. Der Temperaturkoeffizient des Ohmschen Widerstandes von Aluminium a_s beträgt $+4 \cdot 10^{-3}$ pro °C Temperaturerhöhung.

c) *Eisenverlustwiderstand.* Über die Eisenverluste bei konstanter Induktion und variabler Temperatur konnten in der Literatur keine Angaben gefunden werden. Die Abhängigkeit der Eisenverluste bei konstanter Induktion von der Temperatur wurden durch umfangreiche Messungen ermittelt [1][1]).

Als Temperaturkoeffizient a_{pf} der Eisenverluste wurde der Wert $a_{pf} = -7 \cdot 10^{-4}$ pro °C Temperaturerhöhung gefunden. Da der fiktive Eisenverlustwiderstand r_f umgekehrt proportional den Eisenverlusten p_f ist, können wir für den Temperaturkoeffizienten des Eisenverlustwiderstandes a_{rf} setzen:

$$a_{rf} = -a_{pf} = +7 \cdot 10^{-4} \qquad [1/\text{Grad}]$$

d) *Magnetischer Bremsfluss Φ_B*

Der magnetische Fluss Φ_B des permanenten Bremsmagneten hängt ebenfalls von der Temperatur ab. Sein Temperaturkoeffizient $a_{\phi B}$ beträgt ca. $-0{,}55 \cdot 10^{-3}$ pro °C Temperaturerhöhung. Dieser Temperaturkoeffizient gilt für Magnete aus Wolframstahl. Bei den neueren hochkoerzitiven Alnico- und Alcomax-Magneten ist mit einem Temperaturkoeffizienten des magnetischen Bremsflusses von ca. $-0{,}3$ bis $-0{,}4 \cdot 10^{-3}$ pro °C zu rechnen.

Um den resultierenden Temperaturfehler f_t rechnerisch ermitteln zu können, müssen wir die Temperaturabhängigkeit der Vektoren der Spannungs- und Stromtriebflüsse Φ_h und Φ_I kennen. Die Beträge und Phasenwinkel dieser beiden magnetischen Flüsse müssen daher als Funktionen der zahlreichen Zählerkonstanten (z. B. r_1, r_{2h}, r_{2n}, r_f, R_2, R_f usw.) dargestellt werden, deren Temperaturabhängigkeit bekannt ist. Diese Zählerkonstanten können aus dem Vektordiagramm bestimmt werden. Durch Ableiten der Gleichungen für Φ_h, Φ_I, α und ε nach den temperaturabhängigen Grössen erhalten wir die relative Änderung $\triangle\Phi_h/\Phi_h$, $\triangle\Phi_I/\Phi_I$, $\triangle\alpha$ und $\triangle\varepsilon$. Die allgemeine Rechnung führt auf umfangreiche Gleichungen, die wir hier aus Raumgründen nicht aufführen können [1].

Die rechnerischen Untersuchungen über die Temperaturabhängigkeit der Zähleranzeige wurden für den Wirkverbrauchszähler des Typs CF 3 von Landis & Gyr durchgeführt. Die ermittelte Temperaturabhängigkeit stimmte mit der experimentell bestimmten Temperaturabhängigkeit sehr gut überein. Ausserdem konnte der Einfluss der einzelnen temperaturabhängigen Bauelemente im Zähler auf den resultierenden Temperaturfehler berechnet werden, was die Temperaturmessungen am Zähler selber nicht gestatteten.

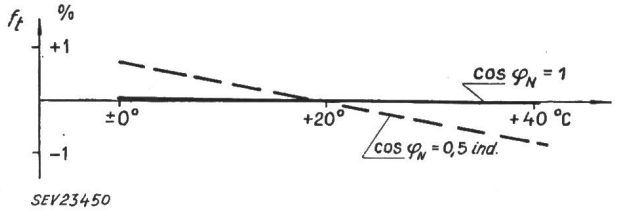

Fig. 3
Einfluss des Ohmschen Widerstandes r_1 der Spannungsspule auf den Temperaturfehler
Bezeichnungen siehe im Text

Die Resultate der berechneten Temperaturabhängigkeit der Zähleranzeige für den CF-3-Zähler sind die folgenden:

a) Der *Einfluss des Ohmschen Widerstandes r_1 der Spannungsspule auf den Temperaturfehler* ist aus Fig. 3 ersichtlich.

b) Den *Einfluss des Ohmschen Widerstandes R_s der Triebscheibe auf den Temperaturfehler* zeigt Fig. 4.

c) Der *Einfluss des magnetischen Bremsflusses Φ_B auf den Temperaturfehler* ist aus Fig. 5 ersichtlich.

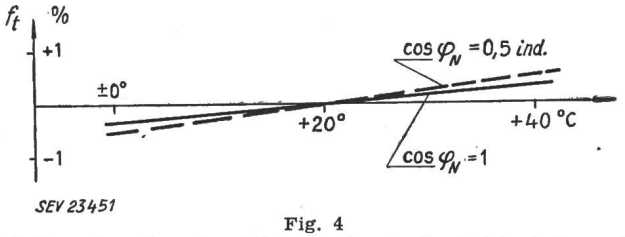

Fig. 4
Einfluss des Ohmschen Widerstandes R_s der Triebscheibe auf den Temperaturfehler
Bezeichnungen siehe im Text

Der Einfluss der Eisenverluste, sowie des Ohmschen Widerstandes der Phasen-Abgleichflügel ist vernachlässigbar klein gegenüber den erwähnten Einflüssen der Spannungsspule, der Triebscheibe und des magnetischen Bremsflusses.

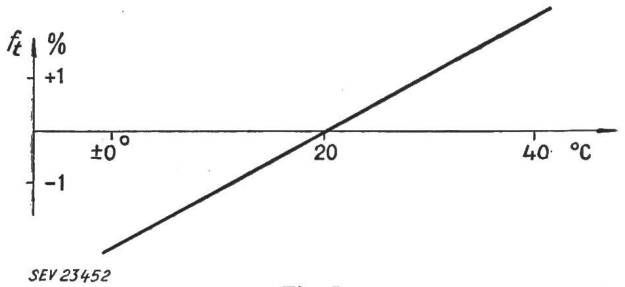

Fig. 5
Einfluss des magnetischen Bremsflusses Φ_B auf den Temperaturfehler
Bezeichnungen siehe im Text

Die Überlagerung der obigen Temperaturkurven ergibt die resultierende Temperaturabhängigkeit des untersuchten Zählers.

[1]) siehe Literatur am Schluss der Arbeit.

Aus Fig. 3 ist ersichtlich, dass der Winkel zwischen der Ohmschen und induktiven Temperaturkurve hauptsächlich durch den temperaturabhängigen Ohmschen Widerstand r_1 der Spannungsspule verursacht wird. Durch Vergrössern des Kupfervolumens der Spannungsspule kann dieser Einfluss verkleinert werden. Fig. 4 zeigt, dass der Einfluss des temperaturabhängigen Scheibenwiderstandes auf den resultierenden Temperaturfehler eher klein ist, da sowohl die Triebflüsse, als auch der Bremsfluss auf die gleiche Triebscheibe wirken. Aus Fig. 5 ist ersichtlich, dass die Temperaturabhängigkeit des magnetischen Bremsflusses Φ_B die Hauptursache bildet für den vom Netzphasenwinkel φ_N unabhängigen Anteil des resultierenden Temperaturfehlers. Der dem tg φ_N proportionale Anteil des resultierenden Temperaturfehlers wird durch den Bremsfluss nicht beeinflusst, da der Winkel zwischen den beiden Triebflüssen Φ_h und Φ_I nicht davon abhängt.

5. Neuzeitliche Mittel zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit der Zähleranzeige

Da der Induktionszähler im Betrieb einem grossen Temperaturbereich ausgesetzt ist und unabhängig von der variablen Temperatur die durchfliessende elektrische Wirkleistung möglichst genau anzuzeigen hat, kommt dem Mittel zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit der Zähleranzeige eine grosse Bedeutung zu. Das Temperaturkompensationsmittel hat die Aufgabe, die Betrags- und Phasenänderungen der elektrischen und magnetischen Grössen im Zähler, die durch Temperaturveränderungen verursacht werden, zu kompensieren, so dass die Zähleranzeige unabhängig von der Temperatur wird.

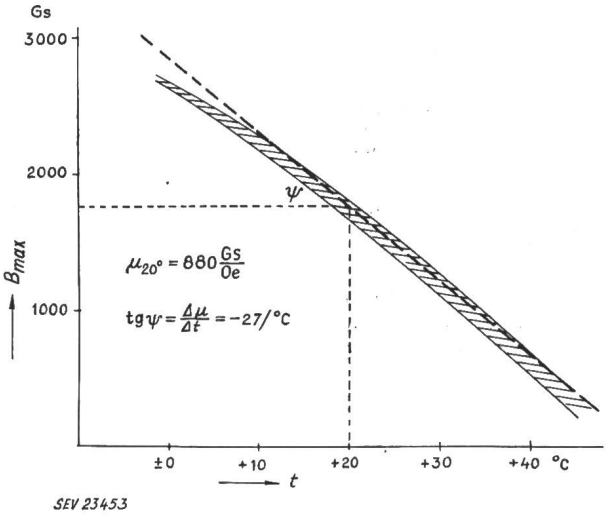

Fig. 6
Magnetische Induktion in Funktion der Temperatur bei H_{eff} = 2,0 Oersted
Wärmelegierung: 30 % Nickel, 70 % Eisen
——— linearisierte Temperaturkurve
$\mu = \frac{B_{max}}{H_{eff}}$ [Gauss] / [Oersted]

Grundsätzlich eignen sich zur Kompensation alle diejenigen Elemente, deren elektrische und magnetische Eigenschaften Funktionen der Temperatur sind, z. B., Ohmsche Widerstände mit positivem oder negativem Temperaturkoeffizienten, magnetische Materialien, deren Permeabilität sich in Funktion der Temperatur verändert. Auch Bimetallkombinationen, welche die magnetische Leitfähigkeit der Flusspfade durch veränderliche Luftspalte beeinflussen, können als Temperaturkompensationsmittel dienen. Heute besitzt man in der sogenannten Wärmelegierung, einer Legierung aus Eisen und Nickel, ein Material, dessen magnetische Leitfähigkeit in starkem Masse von der Temperatur abhängig ist. Bei steigender Temperatur wird das Material magnetisch schlechter leitend. Der Curiepunkt, die Temperatur, bei welcher sich das Material vom magnetischen in den unmagnetischen Zustand umwandelt, ist in die Nähe der Raumtemperatur gerückt. Diese Wärmelegierung kann nun im Zähler auf mannigfaltige Art zur Kompensation des Temperaturfehlers benützt werden.

Beim normalen Zähler wird heutzutage die Wärmelegierung als Temperaturkompensation im Bremsmagneten verwendet. Ein Stück der Wärmelegierung wird als magnetischer Nebenschluss zum Luftspalt des Bremsmagneten geschaltet, so dass ein Teil des magnetischen Flusses durch diesen magnetischen Nebenschluss fliesst. Bei steigender Temperatur wird nun dieser Nebenfluss magnetisch schlechter leitend, so dass eine Flussverlagerung in den Luftspalt des Bremsmagneten stattfindet. Die Komponente des Temperaturfehlers, die unabhängig vom Netzphasenwinkel φ_N ist, kann auf diese Weise ohne Schwierigkeiten kompensiert werden. Auf den Winkel zwischen der Ohmschen und induktiven Temperaturkurve hat jedoch dieses Kompensationsmittel keinen Einfluss, da es nicht auf die gegenseitige Phasenlage der Triebflüsse wirken kann. Man muss daher mittels konstruktiven Massnahmen den Winkel zwischen der Ohmschen und induktiven Temperaturkurve möglichst klein machen, z. B. durch Verwendung einer möglichst dünnen Systemscheibe, durch kräftige Kurzschlusswicklungen aus Kupfer auf dem Stromeisen usw.

Eine Verkleinerung des Temperaturfehlers kann auch durch das Einschalten eines Stückes Wärmelegierung in den Pfad des Stromtriebflusses erreicht werden. Dieses Kompensationsmittel wirkt auf Betrag- und Phasenlage des Stromtriebflusses im richtigen Sinne, d. h., sowohl die vom Netzphasenwinkel φ_N unabhängige Komponente, als auch die dem tg φ_N proportionale Komponente des Temperaturfehlers werden kleiner. Die Anwendung der Wärmelegierung im Pfade des Stromtriebflusses ist aus konstruktiven Gründen nicht sehr bequem.

Ein weiterer Weg für die Kompensation des Temperaturfehlers der Zähleranzeige könnte in Zukunft durch die Anwendung von Ohmschen Widerständen mit negativem Temperaturkoeffizienten beschritten werden. Die Stabilität dieser sogenannten Heissleiter die meistens aus keramischem Halbleitermaterial hergestellt werden, ist jedoch heute noch zu wenig erprobt.

Beim neuen Präzisionszähler der Typenreihe P 7 von Landis & Gyr wird ein kombiniertes Temperaturkompensationsmittel verwendet;

a) Die vom Netzphasenwinkel unabhängige Komponente des Temperaturfehlers wird mit einem

Stück Wärmelegierung im Bremsmagneten kompensiert, wie es beim gewöhnlichen Zähler auch gemacht wird.

b) Die von Netzphasenwinkel φ_N abhängige Komponente des Temperaturfehlers (Winkel zwischen der Ohmschen und induktiven Temperaturkurve), wird zusätzlich durch eine Kombination von Wärmelegierung und Kurzschlusswicklung auf der Rückführung des Spannungsgegenpols kompensiert. Dieses Mittel muss also hauptsächlich auf die Phasenlage des Spannungstriebflusses wirken (Fig. 7).

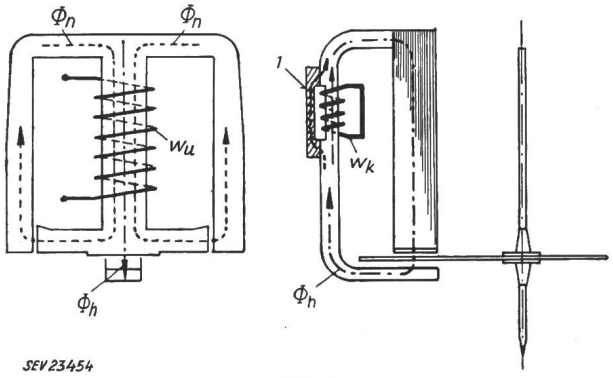

Fig. 7
Schematische Darstellung des Temperaturkompensationsmittels im Pfade des Spannungstriebflusses Φ_h
1 Wärmelegierung
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Auf der Rückführung des Spannungsgegenpols befindet sich eine Kurzschlusswicklung aus Kupfer. Über dieser Wicklung ist dem aktiven Eisen ein Stück der Wärmelegierung parallel geschaltet. In dieser Parallelschaltung tritt bei steigender Temperatur eine Verlagerung des Spannungstriebflusses vom Pfade der Wärmelegierung in denjenigen des Eisens auf. Dadurch wird er in zunehmendem Masse durch die Kurzschlusswindungen belastet und eilt seinem Erregerstrom um einen grössern Phasenwinkel nach. Diese Drehung des Vektors des Spannungstriebsflusses in Richtung der Zeitachse bei steigender Temperatur bewirkt eine Verkleinerung des Winkels zwischen der Ohmschen und induktiven Temperaturkurve, da sie den Phasenwinkel zwischen den beiden Triebflüssen im richtigen Sinne beeinflusst.

6. Technische Schwierigkeiten der Kompensation

Mit dem zuletzterwähnten Temperaturkompensationsmittel gelingt es, den Temperaturfehler der Zähleranzeige bei beliebigen Netzphasenwinkeln φ_N zu kompensieren. Es ist dazu aber notwendig, dass die Permeabilität der Wärmelegierung in Funktion des praktisch auftretenden Temperaturintervalles einen ganz bestimmten Verlauf hat. Abweichungen davon bedingen eine Unter- oder Überkompensation des Temperaturfehlers. Die im Handel erhältlichen Qualitäten der Wärmelegierung weisen in ihren magnetischen Eigenschaften eine gewisse, fabrikationstechnisch bedingte Streuung auf. Diese Streuung in den magnetischen Eigenschaften der Wärmelegierungen setzt die untere Grenze der Temperatur-

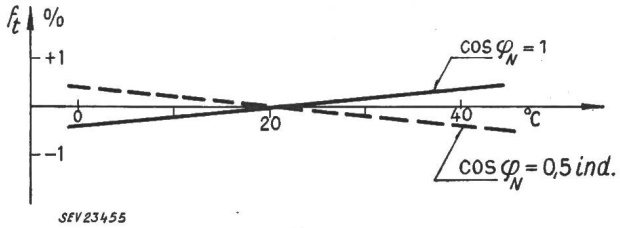

Fig. 8
Fehlerkurve des neuen Präzisionszählers der Typenreihe P7
Bezeichnungen siehe im Text

abhängigkeit der Präzisionszähler fest. Ausserdem variieren die magnetischen Eigenschaften der Wärmelegierungen von Charge zu Charge, so dass das zur Verwendung gelangende Material vor seinem Einbau in den Zähler einer eingehenden Prüfung unterzogen werden muss. Dieser Vorprüfung kommt heute eine immer grösser werdende Bedeutung zu,

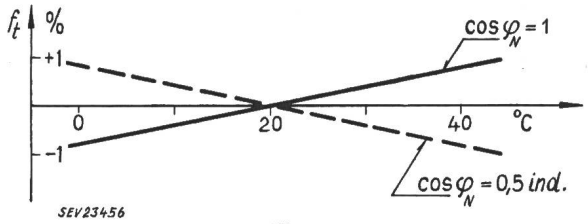

Fig. 9
Fehlerkurve eines der üblichen temperaturkompensierten Wirkverbrauchzähler
Bezeichnungen siehe im Text

da die Anforderungen an die messtechnischen Eigenschaften der Apparate immer grösser werden. Bei den neuen Präzisionszählern kann pro °C Temperaturänderung ein Fehler von 0,02 % bei Verwendung von ausgesuchtem Kompensationsmaterial zwischen 0 °C und +40 °C mit einiger Sicherheit gehalten werden (Fig. 8). Für die üblichen temperaturkompensierten Wirkverbrauchszähler gelten ungefähr die Temperaturabhängigkeiten zwischen 0 °C und +40 °C nach Fig. 9.

Literatur

[1] *Tschappu, Fred:* Untersuchungen über die Temperaturabhängigkeit der Induktionszähler. Diss. ETH. Zürich: Juris-Verlag 1954.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *F. Tschappu,* Landis & Gyr A.-G., Zug.