

**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:** 18.01.2026

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

# 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 Triebssystem besteht aus dem Spannungs-eisen 1, dem Stromeisen 6, welche beide aus gestanzten Dynamoblechlamellen hergestellt sind, und der Trieb-scheibe 8 aus Aluminium, die in den Trieb-luftspalt 10 zwischen Spannungs- und Stromeisen hineinragt. Auf dem mittleren Pol 3 des Spannungs-eisens befindet sich die Spannungsspule 5, bestehend

Drahtes, durch die der Netzstrom  $I_N$  fliesst. Zum kompletten Triebssystem 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  $\Phi_t$  im Spannungseisen. Ein Teil  $\Phi_h$  des gesamten magnetischen Spannungsflusses  $\Phi_t$ , der Spannungstriebfluss, tritt durch den Triebluftspalt und die Trieb-scheibe und schliesst sich durch den Spannungsgegenpol 4 zurück in das Spannungseisen. Der andere Teil  $\Phi_n$  des gesamten magnetischen Spannungsflusses  $\Phi_t$ , der Spannungsnebenschlussfluss, durchsetzt die Trieb-scheibe nicht, sondern fliesst durch die beiden seitlichen Arme 2 des Spannungseisens zurück. Dieser Teil  $\Phi_n$  liefert keinen Beitrag an das Drehmoment. Der Netzstrom  $I_N$  durchfliesst die Stromspule 7 und erzeugt im magnetischen Kreis des Stromeisens den magnetischen Stromtriebfluss  $\Phi_I$ , der die Trieb-scheibe durchdringt und sich über den Pol des Spannungseisens zurück durch die Trieb-scheibe in das Stromeisen schliesst. Vom Spannungstriebfluss  $\Phi_h$  werden in der Trieb-scheibe transformatorisch die Wirbelströme  $i_{2h}$  und vom Stromtriebfluss  $\Phi_I$  die Wirbelströme  $I_2$  induziert. Diese Sekundärströme fliessen in der Trieb-scheibe kreisförmig um den Durchtrittsquerschnitt der magnetischen Trieb-flüsse. In den seitlichen Luftspalten des Spannungseisens sind drehbar gelagert die Phasen-Abgleich-flügel 9 aus Kupfer, mit denen die richtige Phasen-lage des Spannungstriebflusses  $\Phi_h$  eingestellt werden kann.

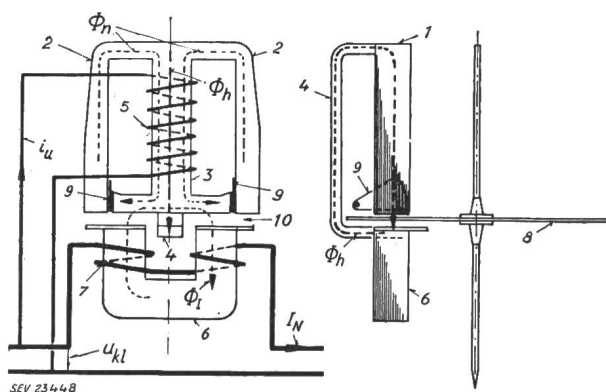


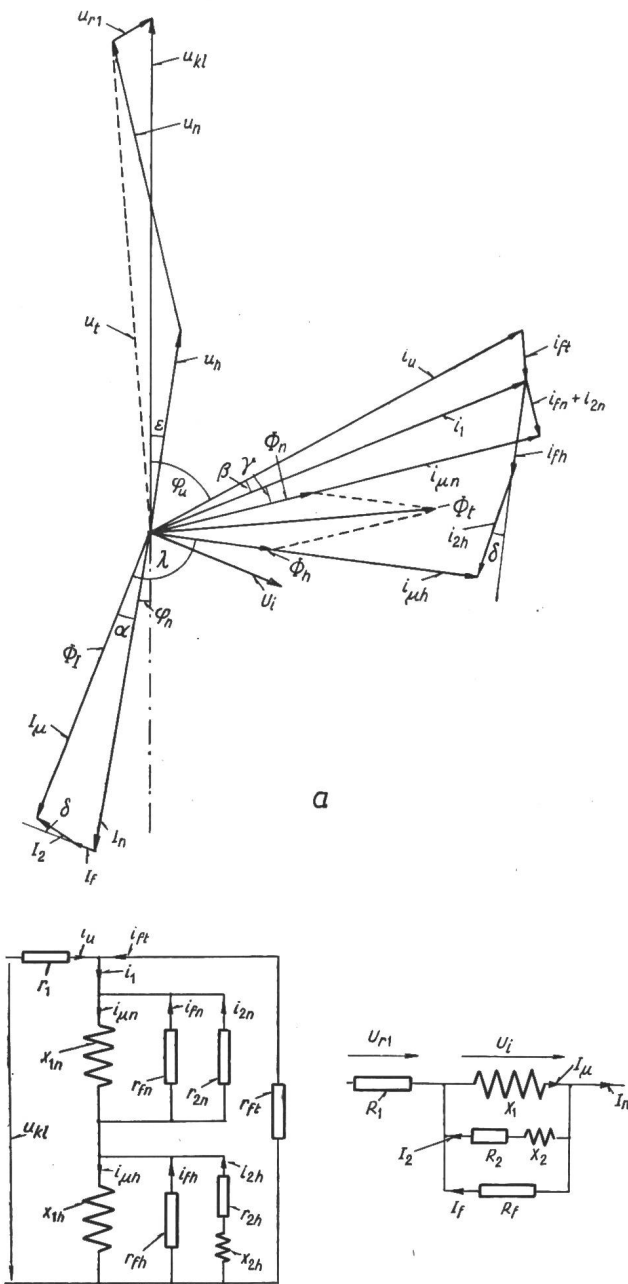
Fig. 1

#### Prinzipieller Aufbau des Induktionszählers

1 Spannungseisen; 2 magnetischer Nebenschluss im Spannungseisen; 3 Spannungspol; 4 Spannungsgegenpol; 5 Spannungsspule; 6 Stromeisen; 7 Stromspule; 8 Trieb-scheibe; 9 Phasen-Abgleichflügel; 10 Triebluftspalt;  $u_{kl}$  Klemmen-spannung;  $i_u$  Strom in der Spannungsspule 5;  $I_N$  Netzstrom;  $\Phi_h$  Spannungstriebfluss;  $\Phi_I$  Stromtriebfluss;  $\Phi_n$  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

Beim normalen Wirkverbrauchszähler müssen bei Ohmscher Netzlast die beiden Triebflüsse  $\Phi_h$  und  $\Phi_I$  einen Phasenwinkel von  $90^\circ$  miteinander einschliessen.



SEV 23449

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
$i_{\mu n}$	Magnetisierungsstrom des Spannungs-Nebenschlussflusses $\Phi_n$
$i_{\mu h}$	Magnetisierungsstrom des Spannungstriebflusses $\Phi_h$
$i_{2n}$	vom Fluss $\Phi_n$ in den Phasen-Abgleichflügeln induzierter Sekundärstrom
$i_{2h}$	vom Spannungstriebfluss $\Phi_h$ in der Triebseibe induzierter Sekundärstrom
$i_{fn}$	Eisenverluststrom, verursacht durch Eisenverluste im Pfade des Spannungs-Nebenschlussflusses $\Phi_n$
$i_{fh}$	Eisenverluststrom, verursacht durch die Eisenverluste im Pfade des Spannungstriebflusses $\Phi_h$
$i_{ft}$	Eisenverluststrom, verursacht durch die Eisenverluste im Pfade des gesamten magnetischen Spannungsflusses $\Phi_t$
$u_h$	vom Spannungstriebfluss induzierte Spannung
$u_n$	vom Spannungsnebenschlussfluss $\Phi_n$ induzierte Spannung
$u_t$	vom gesamten Spannungsfluss $\Phi_t$ induzierte Spannung
$r_1$	Ohmscher Widerstand der Spannungsspule
$r_{2h}$	Ohmscher Widerstand der Triebseibe für Ströme $i_{2h}$
$r_{2n}$	Ohmscher Widerstand der Phasen-Abgleichflügel für die Ströme $i_{2n}$

bezogen auf die Windungszahl der Spannungsspule

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 Wirkverbrauchsähler ca. 0,6...1,1 W. Sie setzen sich zusammen aus:

- Ohmsche Verluste in der Spannungsspule  $p_{r1}$  ca. 25 %
- Ohmsche Verluste in der Triebseibe  $p_{rh}$  ca. 25 %
- Ohmsche Verluste im Phasen-Abgleichmittel  $p_{rn}$  vernachlässigbar klein
- 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:

- Ohmsche Verluste in der Stromspule  $P_{r1}$
- Ohmsche Verluste in der Triebseibe  $P_{r2}$
- 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  $\Phi$  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  $90^\circ$  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  $\Phi_t$  (mittlerer Schenkel des Spannungseisens) dar. Er ist als Sekundärstrom gegenüber  $u_t$  um  $180^\circ$  in der Phase

$x_{2h}$	Streuaktanz der Triebseibe für die Ströme $i_{2h}$
$x_{1h}$	primäre Hauptreaktanz des Spannungstriebflusses $\Phi_h$
$x_{1n}$	primäre Hauptreaktanz des Spannungsnebenschlussflusses $\Phi_n$
$I_N$	Netzstrom
$I_2$	vom Stromtriebfluss $\Phi_t$ in der Triebseibe induzierter Sekundärstrom
$I_f$	Eisenverluststrom im Pfade des Stromtriebflusses $\Phi_t$
$i_u$	Magnetisierungsstrom des Stromtriebflusses $\Phi_t$
$U_t$	vom Stromtriebfluss $\Phi_t$ induzierte Spannung
$R_1$	Ohmscher Widerstand der Stromspule
$R_2$	Ohmscher Widerstand der Triebseibe für Ströme $I_2$
$X_2$	Streuaktanz der Triebseibe für die Ströme $I_2$
$X_1$	primäre Hauptreaktanz des Stromtriebflusses $\Phi_t$
$R_f$	Eisenverlustwiderstand im Pfade des Stromtriebflusses $\Phi_t$

verschoben und wird nach folgender Formel berechnet:

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

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

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

Die Trieb-scheibe 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  $180^\circ + \delta$  nach, wobei der kleine Winkel  $\delta$  ein paar Winkelgrade beträgt. Im Kreise des Spannungsnebenschlussflusses  $\Phi_n$  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  $180^\circ$  verschoben.

Die Verhältnisse im Stromkreis sind wesentlich einfacher. Der magnetische Stromtriebfluss  $\Phi_I$  wird belastet durch den Eisenverluststrom  $I_f$  und den Sekundärstrom  $I_2$  in der Trieb-scheibe. Der Eisenverluststrom  $I_f$  ist gegenüber der induzierten Spannung  $U_i$  in der Phase um  $180^\circ$  verschoben, wogegen der Scheibenstrom  $I_2$  infolge der kleinen Streureaktanz  $X_2$  der Trieb-scheibe gegenüber der induzierten Spannung  $U_i$  um einen Winkel  $180^\circ + \delta$  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  $\Phi_h$  mit den vom Stromtriebfluss  $\Phi_I$  in der Trieb-scheibe induzierten Strömen  $I_2$  nach folgender Formel:

$$M_I = k_1 \Phi_h I_2 \cdot \cos \angle (\Phi_h / I_2)$$

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

b) Das Drehmoment  $M_{II}$  entsteht durch das Zusammenwirken des Stromtriebflusses  $\Phi_I$  mit den vom Spannungstriebfluss  $\Phi_h$  in der Trieb-scheibe induzierten Strömen  $i_{2h}$ , nach folgender Formel:

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

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

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

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

Anhand des Vektordiagrammes in Fig. 2a 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  $\Phi_h$  und  $\Phi_I$  einen Phasenwinkel von  $90^\circ$  miteinander einschliessen. Der Winkel  $\alpha$  muss also in diesem Zustand gleich dem Winkel  $\varepsilon$  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  $\delta$  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  $\Phi_B$  die Trieb-scheibe durchsetzt. Er induziert darin eine EMK der Rotation, welche proportional der Drehzahl der Scheibe ist. Diese EMK verursacht in der Trieb-scheibe 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 Trieb-scheibe 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 Trieb-scheibe 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 Trieb-scheibe 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  $\Phi_h$  und  $\Phi_I$  auch der Bremsfluss  $\Phi_B$  auf dieselbe Triebsscheibe 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 Wirkverbrauchsählern 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  $t' ^\circ\text{C}$ , so ändern folgende Grössen:

$$\begin{aligned}\Phi_h &\rightarrow \Phi_h' = \Phi_h + \Delta \Phi_h \\ I_2 &\rightarrow I_2' = I_2 + \Delta I_2 \\ \Phi_I &\rightarrow \Phi_I' = \Phi_I + \Delta \Phi_I \\ i_{2h} &\rightarrow i_{2h}' = i_{2h} + \Delta i_{2h} \\ \alpha &\rightarrow \alpha' = \alpha + \Delta \alpha \\ \varepsilon &\rightarrow \varepsilon' = \varepsilon + \Delta \varepsilon \\ M_A &\rightarrow M_A' = M_A + \Delta M_A \\ M_B &\rightarrow M_B' = M_B + \Delta M_B\end{aligned}$$

Bei der Temperatur  $t' ^\circ\text{C}$  beträgt das Antriebsmoment  $M_A'$ :

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

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

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

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

$$\cos(\Delta \alpha - \Delta \varepsilon) \approx 1 \text{ und } \sin(\Delta \alpha - \Delta \varepsilon) \approx (\Delta \alpha - \Delta \varepsilon);$$

damit wird:

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

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

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

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

$$\frac{\Delta i_{2h}}{i_{2h}} = \frac{\Delta \Phi_h}{\Phi_h} - \frac{\Delta r_{2h}}{r_{2h}} \quad \frac{\Delta I_2}{I_2} = \frac{\Delta \Phi_I}{\Phi_I} - \frac{\Delta R_2}{R_2}$$

Die Ausdrücke  $\Delta r_{2h}/r_{2h}$  und  $\Delta R_2/R_2$  können wir einander gleichsetzen, da die Scheibenströme  $i_{2h}$  und  $I_2$  in derselben Triebsscheibe fließen. Folglich sind auch die relativen Änderungen der Ohmschen Widerstände ihrer Pfade in der Triebsscheibe 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:

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

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

Diese Formel gilt streng genau nur für unendlich kleine Änderungen der Grössen  $\Phi_h, \Phi_I, R_s, \alpha$  und  $\varepsilon$ . 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  $t' ^\circ\text{C}$  beträgt das Bremsmoment  $M_B'$ :

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

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

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

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

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

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

Eine Änderung des Drehmomentes kann entstehen, wenn die Beträge der magnetischen Flüsse  $\Phi_h, \Phi_I$  und  $\Phi_B$  temperaturabhängig sind. Der daraus resultierende Temperaturfehler ist unabhängig vom Netzphasenwinkel  $\varphi_N$ .

Ausserdem kann eine Drehmomentsänderung entstehen, wenn die gegenseitige Phasenlage von Spannungs- und Stromtriebfluss temperaturabhängig wird. Der daraus resultierende Temperaturfehler ist proportional dem  $\text{tg } \varphi_N$ . 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.

$$a_{r1} = \frac{\Delta r_1}{r_1} \quad [1/\text{Grad}]$$

b) *Triebsscheibe*. 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]<sup>1)</sup>.

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:

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

#### d) Magnetischer Bremsfluss $\Phi_B$

Der magnetische Fluss  $\Phi_B$  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 hochkoerzitativen 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 Stromtriebsflüsse  $\Phi_h$  und  $\Phi_I$  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  $\Phi_h$ ,  $\Phi_I$ ,  $\alpha$  und  $\varepsilon$  nach den temperaturabhängigen Grössen erhalten wir die relative Änderung  $\Delta \Phi_h / \Phi_h$ ,  $\Delta \Phi_I / \Phi_I$ ,  $\Delta \alpha$  und  $\Delta \varepsilon$ . 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.

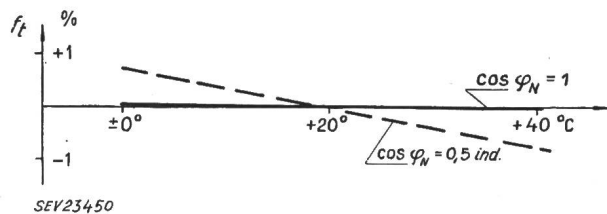


Fig. 3  
Einfluss des Ohmschen Widerstandes  $r_1$  der Spannungsspule auf den Temperaturfehler  
Bezeichnungen siehe im Text

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 Triebsscheibe auf den Temperaturfehler zeigt Fig. 4.

c) Der Einfluss des magnetischen Bremsflusses  $\Phi_B$  auf den Temperaturfehler ist aus Fig. 5 ersichtlich.

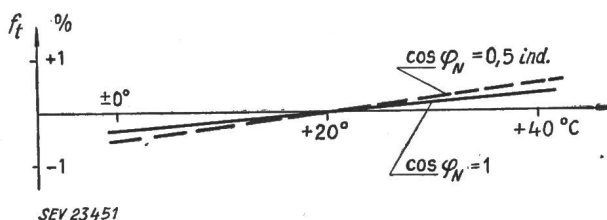


Fig. 4  
Einfluss des Ohmschen Widerstandes  $R_s$  der Triebsscheibe auf den Temperaturfehler  
Bezeichnungen siehe im Text

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

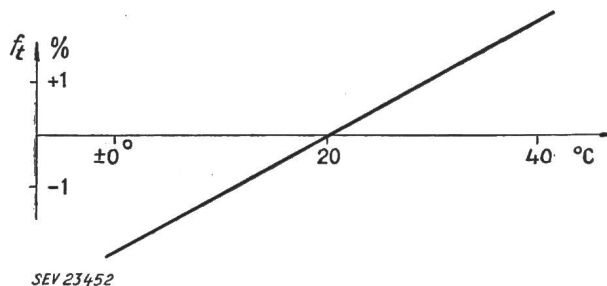


Fig. 5  
Einfluss des magnetischen Bremsflusses  $\Phi_B$  auf den Temperaturfehler  
Bezeichnungen siehe im Text

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

<sup>1)</sup> 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 Triebseibe wirken. Aus Fig. 5 ist ersichtlich, dass die Temperaturabhängigkeit des magnetischen Bremsflusses  $\Phi_B$  die Hauptursache bildet für den vom Netzphasenwinkel  $\varphi_N$  unabhängigen Anteil des resultierenden Temperaturfehlers. Der dem  $\tan \varphi_N$  proportionale Anteil des resultierenden Temperaturfehlers wird durch den Bremsfluss nicht beeinflusst, da der Winkel zwischen den beiden Triebflüssen  $\Phi_h$  und  $\Phi_I$  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.

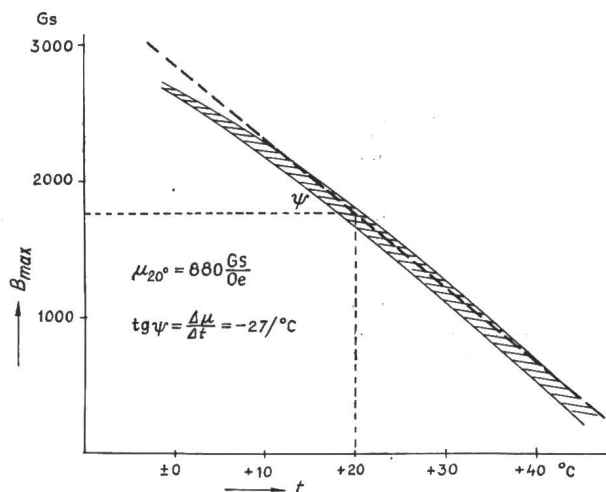


Fig. 6  
Magnetische Induktion in Funktion der Temperatur  
bei  $H_{eff} = 2,0$  Oersted  
Wärmelegierung: 30 % Nickel, 70 % Eisen  
----- linearisierte Temperaturkurve  
 $\mu = \frac{B_{max}}{H_{eff}}$  [Gauss]  
[Oersted]

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, magneti-

sche 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  $\varphi_N$  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  $\varphi_N$  unabhängige Komponente, als auch die dem  $\tan \varphi_N$  proportionale Komponente des Temperaturfehlers werden kleiner. Die Anwendung der Wärmelegierung im Pfad des Stromtriebflusses ist aus konstruktiven Gründen nicht sehr bequem.

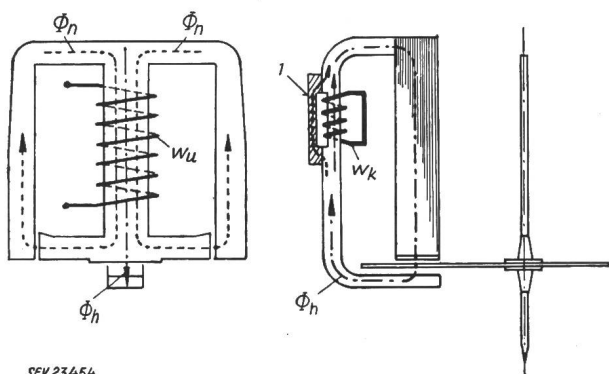
Ein weiterer Weg für die Kompensation des Temperaturfehlers der Zähleranzeige könnte in Zukunft durch die Anwendung von Ohmschen Widerständen mit negativem Temperaturkoeffizienten beschritten werden. Die Stabilität dieser sogenannten Heissleiter die meistens aus keramischem Halbleitermaterial hergestellt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

Beim neuen Präzisionszähler der Typenreihe P7 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  $\varphi_N$  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).



SEV 23454

Fig. 7

Schematische Darstellung des Temperaturkompensationsmittels im Pfad des Spannungstriebflusses  $\Phi_h$

1 Wärmelegierung

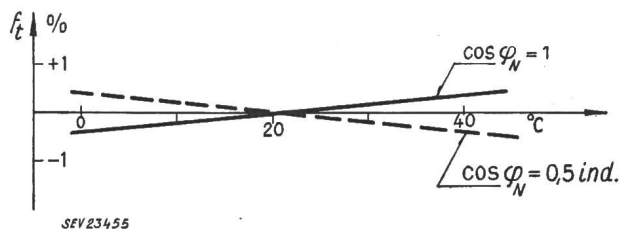
Weitere Bezeichnungen siehe im Text

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 Pfad der Wärmelegierung in denjenigen des Eisens auf. Dadurch wird er in zunehmendem Masse durch die Kurzschlusswindungen belastet und eilt seinem Erregerstrom um einen grösseren Phasenwinkel nach. Diese Drehung des Vektors des Spannungstriebflusses 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 zuletzt erwähnten Temperaturkompensationsmittel gelingt es, den Temperaturfehler der Zähleranzeige bei beliebigen Netzphasenwinkeln  $\varphi_N$  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-

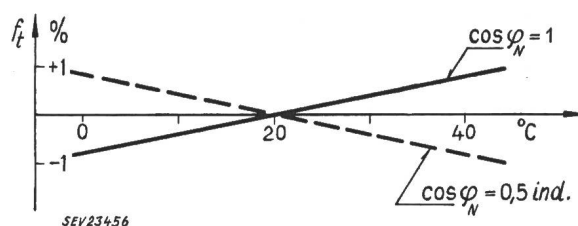


SEV 23455

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,



SEV 23456

Fig. 9

Fehlerkurve eines der üblichen temperaturkompensierten  
Wirkverbrauchszähler  
Bezeichnungen siehe im Text

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