# Berechnungsgrundlage für eine Zweipunkt-Wechselstromreglung mit Thyristoren

Autor(en): **Düll, E.H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **58 (1967)**

Heft 26

PDF erstellt am: **03.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-916318

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

**Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

**http://www.e-periodica.ch**

# Berechnungsgrundlagen für eine Zweipunkt-Wechselstromregelung mit Thyristoren

Von *E. H. Düll*, Darmstadt

62–533.65 : 621.316.721

*Arbeitet eine elektrische Widerstandsheizung mit der üblichen Zweipunkt-Temperaturregelung, so ergibt eine derartige Regelung eine relativ geringe Arbeitsfrequenz. Durch den Einsatz der Leistungselektronik (z. B. Thyristoren) werden sehr viel höhere Arbeitsfrequenzen möglich. Hiedurch lässt sich eine stetig ähnliche Temperaturregelung insofern verwirklichen, als einer stetigen Temperaturregelung eine Zweipunktstromregelung unterlagert wird, deren Arbeitsfrequenz bis etwa 20 Hz betragen kann (50-Hz-Netz). Es werden Strukturbild und Zeitverlauf der wesentlichen Grössen dieser Zweipunktstromregelung abgeleitet unter Berücksichtigung des bei Thyristoren auftretenden Abtasteffektes. Die charakteristischen Grössen werden gleichungsmässig angegeben, insbesondere wird die erzielbare Regelgenauigkeit in Abhängigkeit von Hysteresesymmetrie (Kippglied), Sollwertaussteuerung und Abtastperiode näher untersucht. Einige Hinweise für die praktische Auslegung bilden den Abschluss.*

*Si un chauffage par résistance travaille avec un régulateur de température usuel à deux paliers, ce réglage fournit une fréquence de travail relativement faible. L'application de l'électronique de puissance (p. ex. de thyratrons à semi-conducteurs) permet d'atteindre des fréquences de travail beaucoup plus élevées. Cela permet de réaliser un réglage analogue et continu de la température à condition de superposer ce réglage continu de la température à un réglage du courant à deux paliers d'une fréquence de travail jusqu'à 20 Hz environ (dans un réseau de 50 Hz). L'auteur déduit la structure et la durée des grandeurs essentielles de ce réglage du courant à deux paliers en tenant compte de l'effet d'exploration se manifestant aux thyratrons. Les grandeurs caractéristiques sont indiquées sous forme d'équations, cependant que la précision du réglage réalisable en fonction de la symétrie d'hystérésis (élément de balayage), le réglage de la valeur de consigne et la période de balayage font l'objet d'une étude détaillée. La fin de l'exposé renferme quelques indications sur les applications pratiques.*

## 1. Übersicht

Mit dem weiteren Vordringen der Leistungselektronik ist zwangsläufig eine stärkere Beachtung der sog. Netzrückwirkungen verbunden. Diese Rückwirkungen — bekannt von Stromrichterschaltungen, insbesondere phasenanschnittsgesteuerten Gleichrichterschaltungen — umfassen neben der Verschlechterung des Leistungsfaktors vor allem Oberwellen, RF-Störungen (bedeutsam auch für empfindliche elektronische Steuergeräte) und Gleichstromanteile bei sehr einfachen Gleichrichterschaltungen.

Die stetige Leistungsverstellung mit Hilfe des Phasenanschnittes ist für viele Zwecke die zunächst optimale Lösung bezüglich Dynamik und Strombegrenzung. Anderseits gibt es Anwendungen, wo das kontinuierliche, meist analog gesteuerte Leistungsstellprinzip ersetzt werden kann durch diskontinuierliche Leistungszufuhr. Hiebei ergibt sich die mittlere Leistung naturgemäss durch die Betrachtung z. B. des Tastverhältnisses einer «EIN»-«AUS»-Leistungseinstellung. Selbstverständlich ist dieses Prinzip nur dort sinnvoll, wo die einzustellende bzw. zu regelnde Grösse ausreichende Trägheit besitzt, so dass keine störenden Auswirkungen der Leistungspulsation auftreten. Mit anderen Worten: Das Tiefpassverhalten der Regel- oder Steuerstrecke legt zusammen mit den Forderungen an die zulässige Bewegungsamplitude der Ausgangsgrösse die Mindestschaltfrequenz des Leistungsstellgliedes fest.

Bei Temperaturregelungen mit Hilfe elektrischer Widerstandsheizung wird dieses Prinzip seit langem angewandt. Elektromechanische Schalter dienen dabei als Leistungsschaltglied mit zwei diskreten Zuständen. Durch die bei Temperaturregelungen üblichen hohen Werte der Zeitkonstanten liegt die erforderliche Schalthäufigkeit meist noch in einem Bereich, der für die Lebensdauer der Schütze tragbar ist. Dennoch besteht kein Zweifel, dass die weitere Entwicklung dahin geht, den elektromechanischen Schalter durch elektronische Leistungseinheiten (z. B. Thyristoren) zu ersetzen, deren höhere Schaltfrequenz oft auch zu einer Verbesserung bestehender Temperaturregelungen führt. Die Leistungseinheiten liegen in der Hauptsache im Bereich unter 10 kW, so dass bei üblichen Industrienetzen und einer entsprechend grossen Zahl solcher Geräte keine störende Netzbelastung zu erwarten ist. Infolge ihrer herausragenden Bedeutung sei im folgenden die elektrische Widerstandsheizung als Beispiel herangezogen.

## 2. Die Zweipunktstromregelung in der Anwendung auf die elektrische Widerstandsheizung

Fig. 1 zeigt das Blockschaltbild für einen einfachen Zweipunkt-Temperaturregelkreis. Die Energieschaltstelle sei hiebei bereits durch einen Thyristor angedeutet. Die Arbeitsbewegung dieses Kreises — sie soll hier nicht näher betrachtet werden — ist weitgehend durch die Strecke bestimmt. Eine stetig ähnliche Temperaturregelung wird dadurch erzielt, dass zwei verschachtelte Kreise (Fig. 2) gebildet werden: Übergeordnet ist der, jetzt analoge, Temperaturregelkreis, unterlagert eine Zweipunktstromregelung, die im folgenden näher untersucht werden soll. Das wesentliche Kennzeichen ist dabei die von den Daten der

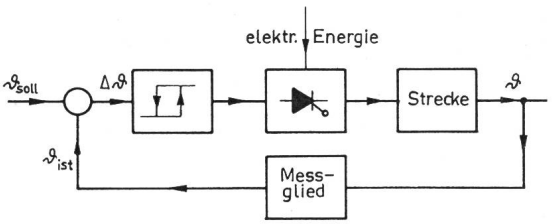



Fig. 1
**Die einfache Struktur eines Temperatur-Zweipunktregelkreises**
$\vartheta$ Temperatur

Heizstrecke unabhängig einstellbare Schaltfrequenz innerhalb des Zweipunktkreises, wodurch letztlich das quasi-stetige Verhalten zustande kommt.

Zur Veranschaulichung ist in Fig. 3 die einfache Ausführung eines Zweipunktstromregelkreises gezeigt. Die Hinweise auf die Grössen $w$, $x$ und $x'$ deuten auf die allgemeinere Behandlung im folgenden hin.

### *2.1 Abschätzung der Streckendaten (Lastimpedanz)*

Die Fragestellung lautet: Welche Verzögerung ist durch die Strecke zu erwarten? Bei Wechselstromkreisen mit $L$- und R-Anteil tritt die Zeitkonstante $\tau = L/R$ als Verzögerung auf. $R$ vertritt dabei die leistungsumsetzende Komponente, während an $L$ ein unerwünschter Spannungsabfall auftritt (Serienschaltung vorausgesetzt). Welche Zeitkonstante unter Beachtung des noch vertretbaren Spannungsabfalles zu erwarten ist, geht aus Gl. (1) hervor:

$$z = \frac{u}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{1-u^2}} \qquad (1)$$

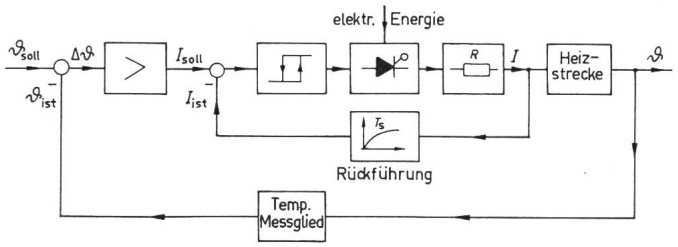



Fig. 2
**Quasistetiger-Temperaturregelkreis**
*I* Strom (innerer Regelkreis)
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

wobei

$$z = \frac{\tau}{T_N} \tag{2}$$

Darin sind $\tau$ Zeitkonstante, $u$ Prozentsatz des induktiven Spannungsabfalles bezogen auf die Netzspannung, $T_N$ Netzperiode.

Beispiel: 50-Hz-Netz, $T_N = 20$ ms, $u = 0{,}1$ (10 % Spannungsabfall) liefert $z = 0{,}016$ das bedeutet, die Zeitkonstante $\tau$ beträgt nur 1,6 % der Netzperiodendauer. Man kann also ohne weiteres mit verzögerungsfreier Strecke (rein Ohmscher Belastung) rechnen.

### *2.2 Abtasteffekt im Leistungsschaltglied*

Bei Einsatz von Thyristoren tritt ein Abtasteffekt dadurch auf, dass zwar die Einschaltung zu jedem Zeitpunkt erfolgen

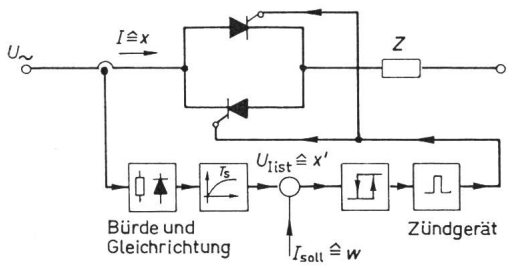



Fig. 3
**Ausführung einer Zweipunktstromregelung**
*Z* Lastimpedanz

kann, die Abschaltung aber immer an den natürlichen Stromnulldurchgang gebunden ist. Die mittlere Abschalt-Abtastperiode $\Delta T_{TA}$ beträgt:

$$\Delta T_{TA} = \frac{1}{4} T_N \tag{3}$$

### *2.3 Hystereseglied und Rückführzeitkonstante*

Für einen Stellbereich von 10...100 % ist die obere Hysteresebreite auf 10 % begrenzt. Praktisch wird man etwa 2...5 % wählen, wobei der Temperaturgang eines elektronischen Hysteresegliedes im Hinblick auf die Abweichung von der symmetrischen Lage zu beachten ist. Die Rückführzeitkonstante dient gleichzeitig zur Unterdrückung der Netzwelligkeit im Strom-Istwert und sollte daher nicht unter dem 5- bis 10-fachen Wert der Netzperiode liegen.

## 3. Strukturbild des Zweipunktregelkreises mit Hystereseglied, Abschalt-Abtastung und Verzögerung

Für die prinzipielle Beschreibung des Regelvorganges ist nur die Hüllkurve der Regelgrösse $x$ ($\triangleq$ Strom $I$) mit den genauen Schaltzeitpunkten von Bedeutung. Die Trennung in Regelteil und Strecke (bzw. Steuer- und Leistungsteil vgl. Fig. 3) ist nicht mehr erforderlich. Die Leistungsschaltfunktion wird vom Hystereseglied übernommen. Der Abschalt-Abtasteffekt wird durch eine Kombination aus normalem Abtastglied (mit Haltung des abgetasteten Wertes) und einfachen logischen Funktionen ersetzt, deren Ein- bzw. Ausgangsgrössen die Werte 0 und 1 zugeordnet sind (Fig. 4). Der Vorgang nach Fig. 4 ist folgender: Wechselt $y$ von 0 nach 1, so wird das Signal $x$ unabhängig von der Lage des Abtastgliedes über das oberste oder unterste «UND»-Glied ebenfalls sofort 1 (Das entspricht der Zündung des Thyristors); geht dagegen $y$ von 1 nach 0, so bleibt $x$ über das mittlere «UND»-Glied solange 1 bis durch den folgenden Abtastvorgang auch der Ausgang des Abtastgliedes 0 geworden ist. (Das entspricht der Löschung des Thyristors im Stromnulldurchgang.)

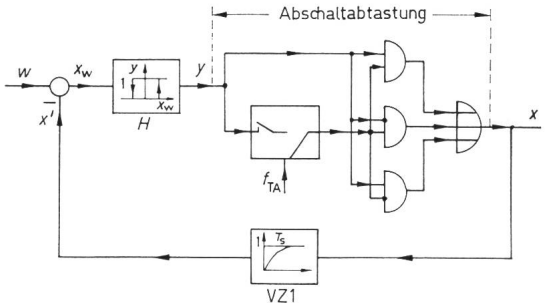



Fig. 4
**Strukturbild eines Zweipunktregelkreises mit Hysterese, Abschalt-Abtastung, Verzögerung 1. Ordnung**
$w$ Sollwert; $x_w$ Regelabweichung; $x$ Regelgrösse; $x'$ Istwert; $y$ Stellgrösse; $f_{TA}$ Abtastfolgefrequenz; $H$ Hystereseglied; VZ1 Verzögerungsglied 1. Ordnung

Die nähere Beschreibung des Hysteresegliedes folgt aus Fig. 5.

Abtastfolgefrequenz: $$f_{TA} = \frac{1}{\Delta T_{TA}} \tag{4}$$

Das Verzögerungsglied (VZ1) mit der Verstärkung 1 wird im weiteren durch seine Zeitkonstante $T_s$ beschrieben. Das Strukturbild nach Fig. 4 ist in dieser Form besonders geeignet zur blockweisen Programmierung von Digital-Rechnern, insbesondere, wenn Analog-Simulationsprogramme vorliegen. Fig. 6 zeigt als Beispiel einen Kurvenausdruck.

### *3.1 Arbeitsfrequenz und Tastverhältnis*

Der zeitliche Verlauf von $x'(t)$ ist stückweise aus e-Funktionen zusammengesetzt. Unterschieden wird ansteigender Anteil $x'_{an}(t)$ und abfallender Anteil $x'_{ab}(t)$. Nach Fig. 7 gilt:

$$x'_{an}(t) = (w - x_{t+}) + (w_{max} - w + x_{t+})\left(1 - e^{\frac{-t}{T_s}}\right); \quad 0 \leqq t \leqq T_{ein} \tag{5}$$

$$x'_{ab}(t) = x'_{an}(t = T_{ein})\, e^{\frac{-t - T_{ein}}{T_s}} \quad T_{ein} \leqq t \leqq (T_{ein} + T_{aus} = T) \tag{6}$$

Hieraus folgt nach einiger Zwischenrechnung für Ein- und Ausschaltzeit:

$$T_{ein} = T_s \ln\left(\frac{w_{max} - w + x_{t+}}{w_{max} - w - x_{t-}}\right) + \Delta T_{TA} \tag{7}$$

$$T_{aus} = T_s \ln\left[1 + \left(\frac{w_{max} - w + x_{t+}}{w - x_{t+}}\right)\left(1 - e^{-\frac{T_{ein}}{T_s}}\right)\right] \tag{8}$$

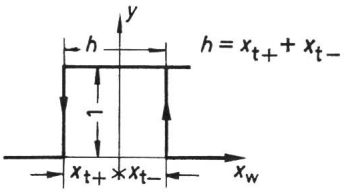
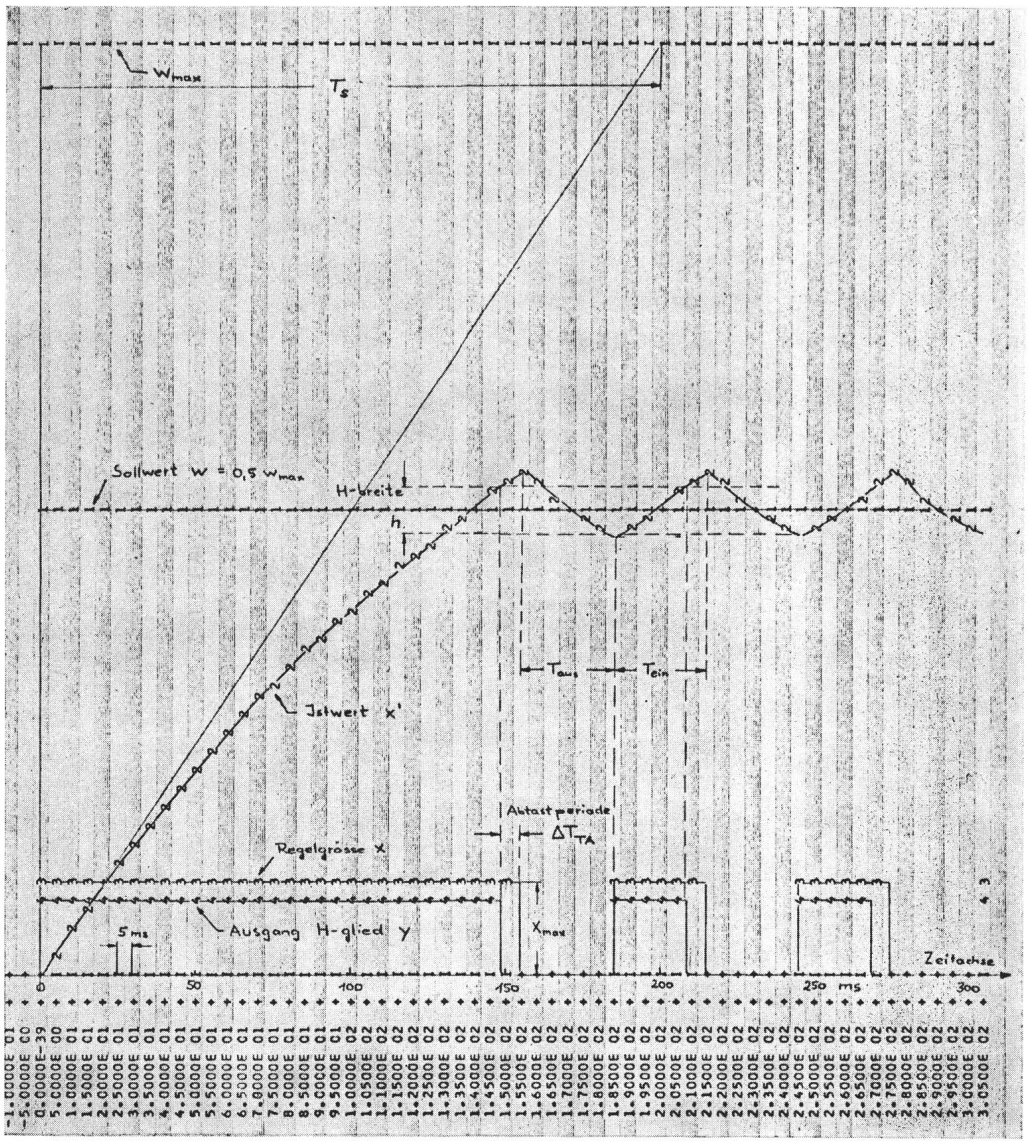



Fig. 5
**Hystereseglied**
(einseitig $y \geqq 0$)
$x_w$ Regelabweichung; $h$ Hysteresebreite, zusammengesetzt aus $x_{t+}$ (links der $y$-Achse) und $x_{t-}$ (rechts der $y$-Achse)

Fig. 6

**Kurvenausdruck für den Übergangsvorgang nach Vorgabe eines Sollwertes von 50 % des Endwertes mit anschliessendem stationärem Betrieb**

Für das Strukturbild (Fig. 4) mit Hilfe eines Analogsimulationsprogrammes auf dem Digitalrechner ermittelt für die Daten:
$k = 0{,}5$ ($w = 0{,}5\ w_{max}$),
$p = 2{,}5\ \%$ ($H$-Breite 5 %, symmetrisch),
Zeitkonstante $T_s = 200$ ms,
Abtastperiode $\Delta T_{TA} = 5$ ms



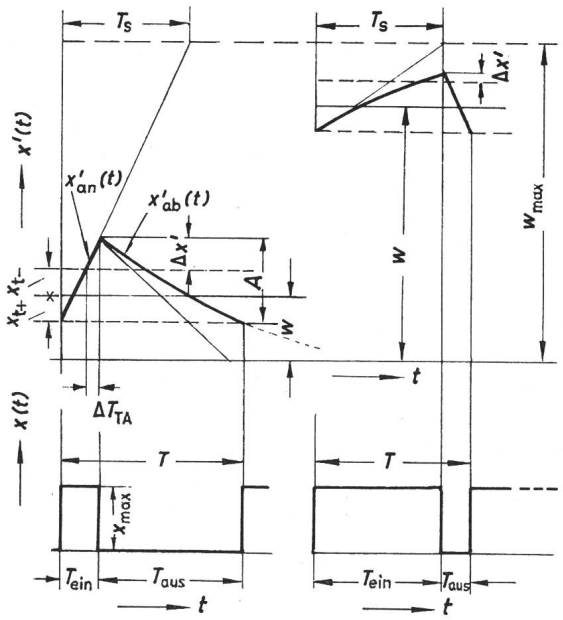




Fig. 7

**Zeitlicher Verlauf $x'(t)$ und $x(t)$ für kleine und hohe Werte $w$**

$x(t)$ Verlauf der Regelgrösse; $x'(t)$ Verlauf des Istwertes; $x_{t+}$, $x_{t-}$ Anteile der Hysteresebreite nach Fig. 5; $x_{an}'$, $x_{ab}'$ ansteigender bzw. abfallender Teil des Istwertverlaufes; $\Delta T_{TA}$ Abschalt-Abtastperiode; $T_s$ Zeitkonstante; $A$ Amplitude des Istwertverlaufes; $w$ Sollwert; $t$ Zeit; $\Delta x'$ Amplitudenerhöhung durch die Abschalt-Abtastperiode; $T$ Periodendauer; $T_{ein} + T_{aus}$

Eine Normung auf den Endwert des Sollwertes $w_{max}$ bringt:

$$k = \frac{w}{w_{max}} \quad \text{(Grad der Aussteuerung)} \tag{9}$$

$$p = \frac{x_{t+} + x_{t-}}{2\, w_{max}} = \frac{h}{2\, w_{max}} \tag{10}$$

$$\left.\begin{aligned} p - c &= \frac{x_{t+}}{w_{max}} \quad (11a) \\ p + c &= \frac{x_{t-}}{w_{max}} \quad (11b) \end{aligned}\right\} \text{ für } x_{t+} = x_{t-} \text{ wird } c = 0$$

Dabei ist $p$ ein Mass für die halbe Hysteresebreite und $c$ für die Verschiebung (Unsymmetrie) der Hysterese bei gleichbleibender Breite, für $c > 0$ Verschiebung nach links, d. h. $x_{t+} < x_{t-}$ (vgl. Fig. 5), $c = 0$ (symmetrische Lage), somit:

$$\frac{T_{ein}}{T_s} = \ln\left(\frac{1 - k + (p - c)}{1 - k - (p + c)}\right) + \frac{\Delta T_{TA}}{T_s} \tag{12}$$

$$\frac{T_{aus}}{T_s} = \ln\left[1 + \left(\frac{1 - k + (p - c)}{k - (p - c)}\right)\left(1 - e^{-\frac{T_{ein}}{T_s}}\right)\right] \tag{13}$$

worin $k$ den Grad der Sollwertaussteuerung angibt [vgl. Gl. (9)].

Ohne Abtasteinfluss, also $\Delta T_{TA} = 0$ ergeben sich die sehr einfachen Beziehungen:

$$\frac{T_{ein}}{T_s} = \ln\left(\frac{1 - k + p - c}{1 - k - p - c}\right) \tag{12a}$$

$$\frac{T_{aus}}{T_s} = \ln\left(\frac{k+p+c}{k-p+c}\right) \tag{13a}$$

Durch Verwendung des linearen Gliedes der e-Reihe ergeben sich für Gl. (12) und (13) folgende Näherungen:

$$\frac{T_{ein}}{T_s} \cong \frac{2p}{1-k+p-c} + \frac{\Delta T_{TA}}{T_s} \tag{14}$$

$$\frac{T_{aus}}{T_s} \cong \frac{1}{1 + \dfrac{k-p+c}{\dfrac{T_{ein}}{T_s}(1-k+p-c)}} \tag{15}$$

Die Grösse des Fehlers dieser Näherungen bleibt für $\Delta T_{TA} = 0$ und $p = 2{,}5\,\%$ (Hysteresebreite 5 %) innerhalb 10 %, so lange gilt $0{,}3 \leqq k \leqq 0{,}7$. In vielen Fällen bringt daher die lineare Näherung nur grob angenäherte Ergebnisse. Sie wird im weiteren nicht benutzt. Die Arbeitsfrequenz:

$$f_A = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_{ein} + T_{aus}} \tag{16a}$$

wird mit Gl. (12) und (13):

$$f_A T_s = \frac{1}{\ln\left(\dfrac{1-k+p-c}{1-k-p-c}\right) + \dfrac{\Delta T_{TA}}{T_s} + \ln\left[1 + \left(\dfrac{1-k+p-c}{k-p+c}\right)\left(1 - e^{-\frac{T_{ein}}{T_s}}\right)\right]} \tag{16b}$$

Das dimensionslose Produkt aus Arbeitsfrequenz und Verzögerungszeitkonstante ist in den Kurven von Fig. 8 aufgetragen für die Parameter $p = 1{,}25\,\%$ und 2,5 % (entsprechend 2,5 % und 5 % Hysteresebreite) und $\Delta T_{TA}/T_s = 2{,}5\,\%$ und 5 %. Der Einfluss von $c$ auf $f_A$ ist gering, so dass $c = 0$ gewählt ist. Am Rande sei hier bemerkt, dass diese Kurven ohne Abtastung symmetrisch zu $k = 0{,}5$ liegen würden, mit wachsender Abtastperiodendauer sinkt das Maximum und verschiebt sich in Richtung grösserer Werte $k$. Im gleichen Bild ist das Tastverhältnis $T_{ein}/T_{aus}$ [mit Gl. (12) und (13)] eingetragen, es liefert für den gewählten Parameterbereich mit guter Näherung nur eine Kurve. Dieser Umstand wird durch einen Vorgriff auf die noch folgenden Fehlerbetrachtungen erklärt. Wird in Gl. (21) die Regelabweichung, d. h. also der Fehler Null annommen, so folgt:

$$k = \frac{\dfrac{T_{ein}}{T_{aus}}}{1 + \dfrac{T_{ein}}{T_{aus}}} \tag{16c}$$

Man erkennt, dass damit $k = f\,(T_{ein}/T_{aus})$ festliegt und Unterschiede nur in der Grössenordnung der mittleren Regelabweichung liegen können (vgl. Tabelle I).

*Praktische Anwendung von Fig. 8*:

Gegeben sei die benötigte Arbeitsfrequenz (vgl. Abschnitt 4.2) und die Verzögerungszeitkonstante (vgl. Abschn. 2.3), damit ergibt sich für den betrachteten Betriebspunkt (z. B. $k = 0{,}8$) ein Parameterpaar $p$ und $\Delta T_{TA}/T_s$, da für $T_s$ bereits Annahmen gemacht wurden und $\Delta T_{TA}$ durch das Netz gegeben ist, erhält man somit $p$. Das Tastverhältnis liegt für $k$ ebenfalls fest. Umgekehrt kann auch für vorgegebene Hysteresebreite $p$ [vgl. Gl. (10)] die erforderliche Zeit $T_s$ ermittelt werden.

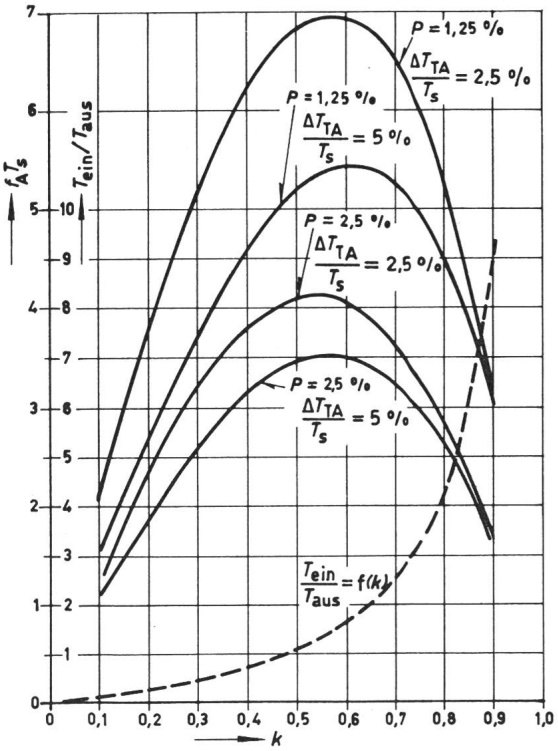



Fig. 8

**Produkt Arbeitsfrequenz $f_A \times$ Verzögerungszeitkonstante $T_s$ und Tastverhältnis $T_{ein}/T_{aus}$ aufgetragen über der Sollwertaussteuerung für verschiedene Hysteresebreiten und Abschalt-Abtastperioden**

$k$ Grad der Sollwertaussteuerung, z. B. $k = 0{,}5$ bedeutet 50 % des maximalen Sollwertes

*Regelgrössenmittelwertfehler $\Delta x_{med}$ bezogen auf die Sollwert-Endwertaussteuerung $w_{max}$*

Tabelle I

| $k$ | $p$ | $c$ | $\frac{\Delta T_{TA}}{T_s}$ | $\frac{\Delta x_{med}}{w_{max}}$ |
|---|---|---|---|---|
| 0,2 | 0,05 | 0,025 | 0,05 | −3,8 % |
| 0,2 | 0,05 | 0 | 0,05 | −1,3 % |
| 0,2 | 0,025 | 0,025 | 0,05 | −4,1 % |
| 0,2 | 0,025 | 0 | 0,05 | −1,7 % |
| 0,8 | 0,05 | 0,025 | 0,05 | −3,4 % |
| 0,8 | 0,05 | 0 | 0,05 | −0,8 % |
| 0,8 | 0,025 | 0,025 | 0,05 | −3 % |
| 0,8 | 0,025 | 0 | 0,05 | −0,6 % |

### 3.2 Amplitude der Bewegung $x'(t)$

Ohne Abtastung beträgt die Spitze-Spitze-Amplitude $A$ des Verlaufes $x'(t)$:

$$A = h$$

Mit Abtastung erhöht sich $A$ um $\Delta x'$ (Fig. 7) und es wird

$$A = \frac{T_{ein}}{T_s}(1-k+p-c) \tag{17}$$

Je nach Wahl von $\Delta T_{TA}$ ist der Amplitudenverlauf über $k$ als mittlere Kurve oder als Grenzkurve aufzufassen (vgl. Gl. [3]).

Fig. 9 zeigt die Kurven für Gl. (17) mit den gleichen Parametern wie bei Fig. 8.

### 3.3 Mittlere Regelabweichung und Regelgrössenmittelwertfehler

Die mittlere Regelabweichung $x_{wmed}$ folgt aus:

$$x_{wmed} = w - x'_{med} \tag{18}$$

$$x_{\mathrm{wmed}} = w - \frac{\int_0^{T_{\mathrm{ein}}} x'_{\mathrm{an}}(t)\,\mathrm{d}t + \int_{T_{\mathrm{ein}}}^{T} x'_{\mathrm{ab}}(t)\,\mathrm{d}t}{T} \tag{19}$$

Nach Zwischenrechnung ergibt sich:

$$\frac{x_{\mathrm{wmed}}}{w_{\max}} = k - \frac{T_{\mathrm{ein}} + T_{\mathrm{s}}(k-p+c) - T_{\mathrm{s}}\,\mathrm{e}^{\frac{-T_{\mathrm{aus}}}{T_{\mathrm{s}}}} + T_{\mathrm{s}}\,\mathrm{e}^{\frac{-T}{T_{\mathrm{s}}}}(1-k+p-c)}{T} \tag{20}$$

$T_{\mathrm{ein}}$, $T_{\mathrm{aus}}$ und $T$ nach Gl. (12) und (13).

Aus Gl. (20), wie auch aus der noch folgenden Beziehung Gl. (25), kann abgelesen werden, dass die mittlere Regelabweichung nur dann zu Null wird, wenn drei Bedingungen erfüllt sind:

a) $\Delta T_{\mathrm{TA}} = 0$ (keine Abtastung)

b) $c = 0$ (symmetrisches Hystereseglied)

c) $k = 0{,}5$ (50-%-Aussteuerung)

Sofern nur a) und b) erfüllt sind, reduziert sich Gl. (20) auf:

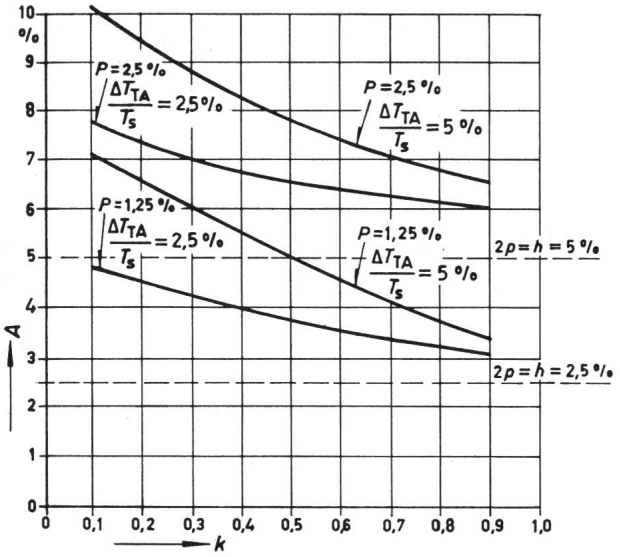



Fig. 9

**Spitze-Spitze-Amplitude $A$ (vgl. Fig. 7) des Verlaufes $x'(t)$, aufgetragen über der Sollwertaussteuerung $k$**

$$\frac{x_{\mathrm{wmed}}}{w_{\max}} = k - \frac{T_{\mathrm{ein}}}{T} \tag{21}$$

$T_{\mathrm{ein}}$ und $T$ nach Gl. (12a) und (13a) mit $c = 0$.

Der Regelgrössenmittelwertfehler $\Delta x_{\mathrm{med}}$ ergibt sich aus:

$$\Delta x_{\mathrm{med}} = w - x_{\mathrm{med}} \tag{22}$$

$x_{\mathrm{med}}$ stellt dabei die gemittelte Grösse der als Schaltfunktion zwischen 0 und $x_{\max} = 1$ verlaufenden Regelgrösse $x$ dar; es gilt demnach:

$$x_{\mathrm{med}} = \frac{T_{\mathrm{ein}}}{T} \tag{23}$$

und

$$\frac{\Delta x_{\mathrm{med}}}{w_{\max}} = k - \frac{T_{\mathrm{ein}}}{T} \tag{24}$$

mit Gl. (12) und (13):

$$\frac{\Delta x_{\mathrm{med}}}{w_{\max}} = k - \frac{\ln\left(\frac{1-k+p-c}{1-k-p-c}\right) + \frac{\Delta T_{\mathrm{TA}}}{T_{\mathrm{s}}}}{\ln\left(\frac{1-k+p-c}{1-k-p-c}\right) + \frac{\Delta T_{\mathrm{TA}}}{T_{\mathrm{s}}} + \ln\left[1 + \left(\frac{1-k+p-c}{k-p+c}\right)\left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{T_{\mathrm{ein}}}{T_{\mathrm{s}}}}\right)\right]} \tag{25}$$

Gl. (25) dient im weiteren zur Bestimmung des Mittelwertfehlers der Regelgrösse. Die mittlere Regelabweichung nach Gl. (20) spielt für den Anwendungsfall Zweipunkt-Wechselstromregelung eine geringere Rolle.

Drei wesentliche Fehlerarten sind zu unterscheiden:

a) Abtastfehler. Er steigt mit $\Delta T_{\mathrm{A}}/T_{\mathrm{s}}$ und erzeugt eine nach Gl. (18) und (22) negative Regelabweichung, die mit der Aussteuerung abnimmt. Für $\Delta T_{\mathrm{TA}} \neq 0$ geht damit auch $T_{\mathrm{s}}$ in den Fehler ein.

b) Hysteresesymmetrie-Fehler. Sein Betrag steigt mit $|c|$ bei folgendem Vorzeichenverhalten:
$c > 0$ Fehler negativ
$c < 0$ Fehler positiv

c) Aussteuerungsfehler. Der Betrag dieser Abweichung steigt mit der Hysteresebreite ($p$) und wachsendem Abstand von der 50-%-Aussteuerung ($k \neq 0{,}5$).
Vorzeichen: $k > 0{,}5$ Fehler negativ
$k < 0{,}5$ Fehler positiv

In Tabelle I sind für zwei Aussteuerungsfälle und mehrere Parameter die Fehler nach Gl. (25) ermittelt. Ergebnis: Mit den üblichen innerhalb folgender Grenzen liegenden Daten $p < 5\,\%$, $\Delta T_{\mathrm{TA}}/T_{\mathrm{s}} < 5\,\%$, $0 < c < 2{,}5\,\%$ und $k = 20$ bis $80\,\%$ erreicht der Mittelwertfehler der Regelgrösse Werte bis nahe $5\,\%$. Durch Vergleich mit den Werten für $c = 0$ wird deutlich, dass der überwiegende Fehleranteil durch Hystereseunsymmetrie zustande kommt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden: Für Regelungen mit zulässiger Abweichung der mittleren Regelgrösse bis etwa $5\,\%$ vom Endwert ist eine besondere Stabilisierung der Hysteresesymmetrie nicht erforderlich, solange $|c| \leqq p$ und $\Delta T_{\mathrm{TA}}/T_{\mathrm{s}} \leqq 5\,\%$ (das bedeutet praktisch die Verwendung einfacher Transistorkippschaltungen). Für Fehlerbereiche bis $1\,\%$ ist in jedem Fall eine gute Stabilisierung $|c| \ll p$ notwendig (z. B. Hystereseglied mit operational amplifier).

## 4. Hinweise für die praktische Auslegung

### *4.1 Stellbereich*

In den meisten Fällen genügt ein Stellbereich von 10...100 %; stetig durchlaufen werden dabei 10...90 % (Fig. 10), die maximal zulässige Hysteresebreite liegt damit im Bereich $p < 5\,\%$.

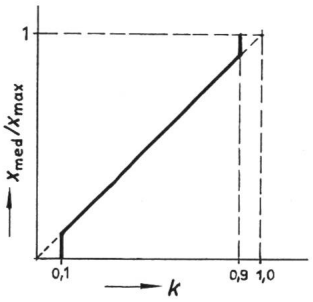



Fig. 10

**Idealisierte Abhängigkeit des Mittelwertes der Regelgrösse $x$ von der Sollwertaussteuerung für 10...90 % stetigen Steuerbereich**

$k$ Grad der Sollwertaussteuerung

### *4.2 Arbeitsfrequenz und Auswirkung der Schaltfunktion $x(t)$*

Mit $x$ als Regelgrösse interessiert die Arbeitsfrequenz $f_{\mathrm{A}}$ bei dem Nennarbeitspunkt [darunter sei der Nenn-Betriebswert zu verstehen; der Überschuss ausgedrückt durch $(1 - k)$ stellt die in jedem Fall einzukalkulierende Regelreserve dar]. $f_{\mathrm{A}}$ wird bestimmt durch die zulässigen Auswirkungen von $x(t)$

auf die überlagerte Regelgrösse (z. B. Temperatur $\vartheta$). Wenn der Frequenzgang $|F| = \vartheta/x$ zumindest angenähert bekannt ist, kann mit Hilfe der allgemeinen Fourierzerlegung für $x(t)$ [Gl. (26)] die Auswirkung der Grundfrequenz in $x(t)$ leicht abgeschätzt werden [Gl. (27)]:

$$x(t) = \frac{2}{\pi} x_{\max} \frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_{\text{ein}}}{T} + \sum_{1}^{n} \frac{1}{n} \sin\left(n\pi \frac{T_{\text{ein}}}{T}\right) \cos(n \cdot 2\pi f_A t) \tag{26}$$

Die Grundwellenamplitude ist:

$$\hat{x}_1 = \frac{2}{\pi} x_{\max} \cdot \sin\left(\pi \frac{T_{\text{ein}}}{T}\right) \tag{27}$$

Die praktisch nutzbare Arbeitsfrequenz liegt bei 50-Hz-Energieversorgung in der Gegend von 20 Hz. Darüber hinaus macht sich der Abtasteinfluss nachteilig bemerkbar und man muss gegebenenfalls auch eine Einschalt-Abtastung vorsehen, wenn der statistisch auftretende Phasenausschnitt bei der Einschaltung stört.

### Literatur


[1] *C. Kessler:* Ein Beitrag zur Theorie des Zweipunktreglers. Regelungstechnik 5(1957)10, S. 339...342.

[2] *W. T. Bane:* Design Charts for an ON/OFF Control System. Trans. Soc. Instrum. Technol. 5(1953)2, S. 52...61.

[3] *W. Oppelt:* Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge. Weinheim, Verlag Chemie 1954.



**Adresse des Autors:**

Dr. *Ernst Hermann Düll,* Laboratoriumsleiter, Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft, Am Elfengrund 7, D–61 Darmstadt.


# Die Informationen in Elektrizitätswerken und deren Übertragung

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 20. September 1967 in Zürich,


von *F. Schär,* Olten



65.011.56:621.39:621.31



*Es wird ein Überblick über die vielen und verschiedenartigen Informationen gegeben, die bei Elektrizitätswerken anfallen und zu übertragen sind. Die hierbei auftretenden Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit der Übertragung werden dargelegt. Ferner wird auf die grosse Anzahl von Kanälen hingewiesen, welche die Werke benötigen. Anhand einiger typischer Bilder aus einem grossen amerikanischen Werk wird auf die zukünftigen weiteren Entwicklungsrichtungen und grossen Anforderungen hingewiesen.*

*L'auteur présente un aperçu des informations multiples et diverses reçues et transmises par les centrales électriques, en exposant les exigences relatives à la sûreté et la rapidité de la transmission. Il relate en outre le grand nombre de canaux indispensables aux centrales. A l'aide de quelques illustrations typiques, se rapportant à une grande centrale américaine l'auteur indique les tendances d'évolution ultérieures et les grandes exigences futures.*


## 1. Das öffentliche Telephon

Es ist, wie Sie alle wissen, auch ein universelles Hilfsmittel für den Betrieb. Durch die automatische Wahl kann die Verbindung meist rasch erstellt werden. Bei Störungen in einem Stromversorgungsnetz machen sich jedoch einige Nachteile bemerkbar. Oft ruft zuerst ein unbedeutender Kunde beim Elektrizitätswerk an und weist dauernd auf die grossen Nachteile hin, die der Energieausfall in diesem Moment für ihn hat. Damit belegt er aber eine wichtige Verbindung für einen relativ unbedeutenden Zweck. Er blockiert den Betriebsleiter und sein wichtigstes Hilfsmittel in den kostbarsten Minuten. Eine kleine Abhilfe stellt die Geheimnummer dar, die nur denjenigen bekannt ist, die sie auch im Störungsfall benützen dürfen.

## 2. Telexverkehr

Der Telexverkehr wird natürlich von den Elektrizitätswerken in ausgiebigem Mass benützt; insbesondere leistet er sehr gute Dienste für die Programmübermittlung von den Lastverteilerstellen an die verschiedenen Zentralen und andern Gesellschaften sowie für die Übermittlung von Statistiken aus Partnerkraftwerken.

## 3. Die Netzkommando-Anlagen

Netzkommando-Anlagen geben anstelle der Schaltuhren die Befehle für den Beginn des Nieder- und Hochtarifs genau zur richtigen Zeit und bieten daneben den grossen Vorteil, wenn es nötig ist, jederzeit auf die Verbraucher einwirken zu können, z. B. auch bei sehr grossen Störungen zum Last abwerfen.

## 4. Leitungsgerichtete Hochfrequenztelephonie (TFH)

Die TFH hat den grossen Vorteil, dass sie nur den Betriebsleuten, dafür aber uneingeschränkt, zur Verfügung steht. Sie hat aber gleichzeitig den Nachteil, dass sie nur dorthin führt, wo auch Hochspannungsleitungen vorhanden sind. Für relativ kurze Distanzen, darunter sind jene verstanden, die bis zum nächsten Unterwerk oder Kraftwerk führen, funktioniert die Verbindung in der Regel einwandfrei. Je grösser die Distanzen aber werden, desto mehr Zwischenstationen durchläuft der Kanal. Bei einer Störung im Hochspannungsnetz wollen sich sozusagen alle Betroffenen via Hochfrequenztelephon gleichzeitig erkundigen, was passiert ist. Das Resultat ist ein besetztes Telephon, über welches die Verbindung nur mit grosser Zeitverzögerung zustande kommt. Immerhin ist zu sagen, dass man wichtigen Zentren eine Prioritätsschaltung zuteilen kann, die gestattet, den gewünschten Teilnehmer *sofort* zu erreichen.

Die zwei Beispiele zeigen, dass den manuellen Eingriffen per Telephon bei Störungen harte Grenzen gesetzt sind.

## 5. Fernmelden

Zu den wichtigsten Fernmeldungen gehören die Schalterstellungen, wie sie heute in den modernen Lastverteilern signalisiert sind. Schalterstellungen müssen möglichst rasch ferngemeldet werden, insbesondere dann, wenn es sich um Störungen handelt und die Betriebsleitung *sofort* einen guten Überblick für die nächsten Entscheide haben muss. Meistens erfolgen die Rückmeldungen in ein Blindschema im Lastverteilerraum. Dazu kommen alle Signale, z. B. für ein Unterwerk, wie sie sich aus einer automatischen Überwachung ergeben.