

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 50 (1959)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Mehrphasenwattmeter beruhend auf der magnetischen Widerstandsänderung von Halbleitern  
**Autor:** Strutt, M.J.O. / Sun, S.F.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059452>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 03.04.2025

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

Kosten derjenigen im Niveau 1 vermehrt, und zwar so lange, bis beide Beträge gleich, nämlich  $(N_1 + N_3) / 2$  sind. Durch diesen «Pump-Effekt» ist das thermodynamische Gleichgewicht gestört; im Energieniveau 2 befinden sich mehr Teilchen als im Niveau 1 (Fig. 4a). Durch «Stimulierung» mit einer von aussen zuge-

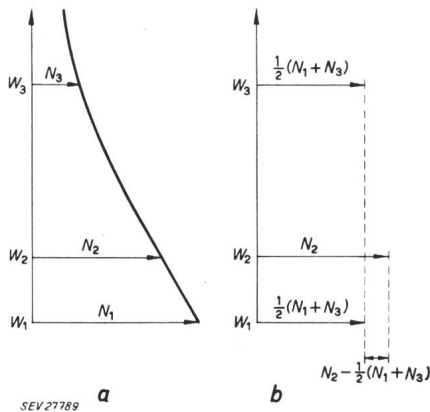


Fig. 4

Energieniveaux und Besetzungsdichte eines dreistufigen Festkörper-Masers

a vor der Energiespeicherung (thermodynamisches Gleichgewicht)  
b nach der Energiespeicherung (Pumpeffekt)

führten schwachen Strahlung der Frequenz  $\nu_{12} = (W_2 - W_1) / h$  kann wieder ein Übergang zum Niveau 1 erzwungen werden unter Abgabe von gleichphasiger Strahlung aller beteiligten Teilchen. Bei genügender Energieakkumulierung durch den Pumpeffekt liegt dann eine Verstärkerwirkung vor. Die Wahl des äusseren Magnetfeldes beeinflusst den Betrag der Energieniveaux, so dass ein solcher Festkörper-Maser auf die Frequenz der zu verstärkenden Welle einregulierbar ist. Das Rauschen dieser Verstärker ist äusserst gering, worauf insbesondere Bloembergen [4] aufmerksam gemacht hat. Die Energiespeicherung muss allerdings bei einer Frequenz erfolgen, die höher ist als diejenige der Abstrahlung.

### Anwendungen

Jeder Bereich der ausserordentlich umfangreichen Skala technischer Wechselstromfrequenzen hat seine besonderen Anwendungen und Anwendungsmöglich-

keiten. Mikrowellen sind für die Nachrichtentechnik unentbehrlich; sie verdanken hier ihre Nützlichkeit vor allem der Möglichkeit der Richtstrahlbildung (Bündelung) durch Hohlspiegel und Trichter (Hörner), ferner der Möglichkeit von sehr breitbandigen Übertragungen mit grossem Informationsgehalt, wie sie bei der Mehrkanaltelephonie und dem Fernsehen vorkommen. Auf dem Richtstrahlwege lassen sich mehr als tausend Telefongespräche gleichzeitig führen. Wo es sich nicht um letzte Genauigkeit handelt, wird der klassischen Vermessung durch die Radiotelemetrie mit der Zeit ein fühlbarer Konkurrent entstehen. Die Bedeutung für die physikalische Forschung (Elektronenbeschleuniger, Festkörperphysik, Molekular-Spektroskopie) ist bereits erwähnt worden. Voraussichtlich wird die Mikrowellentechnik in der Plasmaphysik, d. h. in der Physik hochionisierter Gase noch eine wichtige Rolle zu spielen haben. Schliesslich ist die Astronomie an der Mikrowellentechnik und ihren Fortschritten sehr interessiert. Mit ihren Radioteleskopen, die mit riesigen Hohlspiegeln ausgerüstet sind, empfängt sie schwächste Signale aus dem Weltraum (dunkle Sterne, Wasserstoff-Wolken). Die Verwendung von Maser-Verstärkern wird dabei höchste Empfindlichkeit zulassen. Dann darf man sogar daran denken, Messungen auszuführen, die bei der Beantwortung schwierigster kosmologischer Fragen, wie z. B. der kontinuierlichen Erzeugung von Wasserstoff im Welt- raum, Entscheidendes auszusagen haben.

### Literatur

- [1] Hahn, W. C.: Small Signal Theory of Velocity-modulated Electron. Beams. Gen Electr. Rev. Bd. 42 (1939), Nr. 6, S. 258...270.
- Ramo, S.: Space Charge and Field Waves in an Electron. Beam. Phys. Rev. Bd. 56 (1939), 1. August, S. 276...283.
- [2] Chodorow, M., E. L. Ginzton, J. Jasberg, J. V. Lebacqz und H. J. Shaw: Development of High-Power Pulsed Klystrons for Practical Applications. Proc. IRE Bd. 47 (1959), Nr. 1, S. 20...29.
- [3] Karp, A.: Backward-Wave Oscillator Experiments at 100 to 200 Kilomegacycles. Proc. IRE Bd. 45(1957), Nr. 4, S. 496...503.
- [4] Bloembergen, N.: Proposal for a New Type Solid State Maser. Phys. Rev. Bd. 104 (1956), Nr. 2, S. 324...327.

### Adresse des Autors:

Prof. Dr. F. Tank, Vorstand des Institutes für Hochfrequenztechnik an der ETH, Sternwartstrasse 7, Zürich 7/6.

## Mehrphasenwattmeter beruhend auf der magnetischen Widerstandsänderung von Halbleitern<sup>1)</sup>

Von M. J. O. Strutt und S. F. Sun, Zürich

621.317.784.025.4: 621.315.592

### Einleitung

In früheren Veröffentlichungen sind Mehrphasenwattmeter beschrieben worden, welche auf dem Halleffekt von Halbleitern beruhen [1; 2; 3]<sup>2)</sup>. Hiebei wurden die halbleitenden Verbindungen Indiumantimonid und Indiumarsenid verwendet. Die Elektrizitätsträger

<sup>1)</sup> Diese Arbeit wurde im Institut für höhere Elektrotechnik der ETH durchgeführt. Sie wurde zum Teil durch einen Kredit des Aluminiumfonds Neuhausen finanziert.

<sup>2)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

weisen in diesen Verbindungen eine viel grössere Beweglichkeit auf als in Germanium oder Silizium. Infolgedessen ist der Halleffekt ebenfalls viel grösser. Eine Folge des Halleffektes ist die magnetische Widerstandsänderung, welche meistens nach C. F. Gauss benannt wird. Sie besteht darin, dass der Widerstand eines Plättchens zunimmt, wenn ein transversales magnetisches Feld angelegt wird [4]. Diese magnetische Widerstandsänderung hängt stark von der Gestalt des verwendeten Halbleiterplättchens ab (Fig. 1). Sie ist

am grössten für eine Kreisscheibe mit einem zentralen Kontakt und einem zweiten Anschluss in Ringform am Umfang. Wie aus Fig. 1 ersichtlich ist, kann für eine solche Scheibe der Widerstand bei einer transversalen magnetischen Flussdichte von 10 kGs auf etwa das 18fache dieses Wertes ohne Magnetfeld ansteigen.

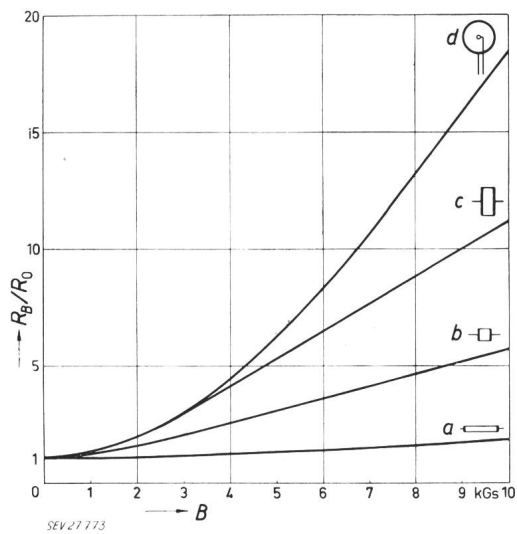


Fig. 1

Verhältnis des Widerstandes  $R_B$  bei der transversalen magnetischen Flussdichte  $B$  zum Widerstand  $R_0$  bei der Flussdichte Null für Plättchen aus Indiumantimonid von verschiedenen Gestalten

- a langes Rechteck
- b Quadrat
- c kurzes Rechteck
- d Kreisscheibe

### Einphasenwattmeter für Wirkleistung

Aus den Kurven der Fig. 1 geht hervor, dass die Änderung des Widerstandes für kleine magnetische Flussdichten (z. B. 1 kGs) etwa proportional zum Quadrat der Änderung der Flussdichte ist. Für grosse Flussdichten (z. B. 6 kGs) ist aber die Änderung des Widerstandes der ersten Potenz der Änderung der Flussdichte angenähert proportional. Dies kann wie folgt ausgedrückt werden:

Der Widerstand bei der Flussdichte  $B$  sei  $R_B$ . Der Widerstand bei der Flussdichte  $B + \Delta B$  sei  $R$ . Dann gilt:

$$R - R_B = \left(\frac{dR}{dB}\right)_B \Delta B + \frac{1}{2} \left(\frac{d^2R}{dB^2}\right)_B (\Delta B)^2 + \frac{1}{6} \left(\frac{d^3R}{dB^3}\right)_B (\Delta B)^3 + \dots \quad (1)$$

Die Differentialquotienten beziehen sich auf die Kurve des Widerstandes als Funktion der Flussdichte. Sie sind bei der Flussdichte  $B$  zu bilden. Für kleine Flussdichten ist der erste Differentialquotient multipliziert mit  $\Delta B/R_B$  klein gegen 1, der zweite Differentialquotient multipliziert mit  $(\Delta B)^2/R_B$  viel grösser, der dritte Differentialquotient multipliziert mit  $(\Delta B)^3/R_B$  wieder viel kleiner. Für grosse Flussdichten ist der erste Differentialquotient multipliziert mit  $\Delta B/R_B$  viel grösser als der zweite Differentialquotient multipliziert mit  $(\Delta B)^2/R_B$  und als der dritte Differentialquotient multipliziert mit  $(\Delta B)^3/R_B$ . Für grosse Flussdichten  $B$  (z. B. 6 kGs) kann man also mit guter Näherung schreiben:

$$R - R_B = R_W = \left(\frac{dR}{dB}\right)_B \Delta B \quad (2)$$

Wir setzen:

$$\Delta B = B_{max} \sin \omega t \quad (3)$$

Die Flussdichteamplitude  $B_{max}$  sei proportional zur Amplitude  $U_{max}$  der Phasenspannung. Auf die Schaltung, durch welche diese Proportionalität erzielt wird, soll später noch näher eingegangen werden.

Durch das Halbleiterplättchen fliesst ein Strom  $i_s$ , welcher proportional zum Phasenstrom  $I_{max} \sin(\omega t + \varphi)$  ist. Somit gilt für den Wechselflusswiderstand  $R_W$ :

$$\left. \begin{aligned} R_W &= k_U U_{max} \sin \omega t \\ i_s &= k_I I_{max} \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Die Spannung  $u_s$  an den Klemmen des Halbleiterplättchens ist:

$$\left. \begin{aligned} u_s &= i_s (R_W + R_B) = \\ &= k_U k_I U_{max} I_{max} \cdot \frac{1}{2} \cos \varphi - \\ &- k_U k_I U_{max} I_{max} \cdot \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \varphi) + \\ &+ k_I I_{max} \sin(\omega t + \varphi) R_B \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Die Spannung  $u_s$  besteht aus drei Anteilen: einem Gleichspannungsanteil  $u_{s0}$ , einem Wechselspannungsanteil mit der Kreisfrequenz  $2\omega$  und einem Wechselspannungsanteil mit der Kreisfrequenz  $\omega$ .

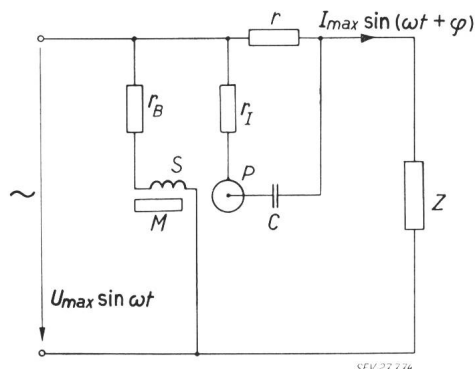


Fig. 2

Schaltung zur Messung der in der Impedanz  $Z$  verbrauchten Wirkleistung mit Hilfe des Halbleiterplättchens  $P$ , das einen zentralen und einen ringförmigen Kontakt aufweist

$U_{max}$	Phasenspannungsamplitude	$I_{max}$	Phasenstromamplitude
$r_B$	Reihenwiderstand	$S$	Elektromagnet
$M$	permanenter Magnet	$r$	Shuntwiderstand
$r_I$	Reihenwiderstand	$P$	Kreisplättchen
$C$	Kapazität	$Z$	Verbraucherimpedanz

Eine Schaltung, durch welche die Gl. (4) verwirklicht wird, zeigt Fig. 2. Die Spule  $S$ , welche auf einen Kern aus geeignetem Material (z. B. Permalloy) gewickelt ist, hat die Selbstinduktion  $L$ . Der Widerstand  $r_B$  ist so gewählt, dass  $r_B \gg \omega L$ . Hiedurch wird der Strom durch  $S$  proportional zur Phasenspannung  $U_{max} \sin \omega t$ . Das gleiche gilt für die Wechselflussdichte  $\Delta B$ , welche durch die Spule  $S$  erzeugt wird. Ein permanenter Magnet  $M$ , welcher in den magnetischen Kreis eingebaut ist, erzeugt die konstante Flussdichte  $B$ , über welche die Wechselflussdichte  $\Delta B$  überlagert ist. Im Luftspalt des magnetischen Kreises befindet

sich das Halbleiterplättchen  $P$ , das die Form einer Kreisscheibe hat. Der Strom durch diese Kreisscheibe wird mit Hilfe der Widerstände  $r$  und  $r_I$  proportional zum Phasenstrom  $I_{max} \sin(\omega t + \varphi)$  gemacht. Der Widerstand  $r_I$  soll gross gegen den Widerstand der Halbleiterscheibe  $P$  sein, damit dieser Widerstand den Strom nicht beeinflusst. Es ist möglich, an Stelle des Widerstandes  $r_B$  einen geeigneten Spannungswandler mit einem Widerstand  $r_B$  auf der Sekundärseite zu verwenden. Ebenso ist es möglich, anstelle von  $r$  einen geeigneten Stromwandler zu verwenden. Wichtig ist, dass hiebei folgende Bedingungen gewahrt bleiben:

1. Die Wechselflussdichte  $\Delta B$  muss zur Phasenspannung nach Grösse und Phase proportional sein;
2. Der Strom  $i_s$  muss zum Phasenstrom nach Grösse und Phase proportional sein;
3.  $i_s$  muss nicht vom Widerstand des Plättchens  $P$  abhängen.

Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, geht aus Gl. (5) hervor, dass der Gleichspannungsanteil  $u_{s0}$  von  $u_s$  proportional zur Wirkleistung ist, welche in der Impedanz  $Z$  der Fig. 2 verbraucht wird. Hiebei ist die Wirkleistung, welche im Plättchen  $P$ , im Widerstand  $r_I$  und in  $r$  verbraucht wird, vernachlässigt worden. Als vierte Bedingung muss also diese letztere Wirkleistung klein gegen jene sein, welche in der Impedanz  $Z$  verbraucht wird. Eine analoge Bedingung zu dieser letztgenannten gilt auch bei normalen Wattmetern.

Durch die Gleichspannung  $u_{s0}$  an den Klemmen von  $P$  entsteht im Kreis, der durch  $r_I$  und  $r$  gebildet wird, ein Gleichstrom. Dieser Gleichstrom bewirkt über dem Widerstand  $R_B$  des Plättchens  $P$  einen Spannungsabfall, durch welchen die resultierende Gleichspannung an den Klemmen von  $P$  herabgesetzt wird. Um dies zu verhindern, ist ein geeigneter Kondensator  $C$  im erwähnten Stromkreis eingebaut. Die Impedanz dieses Kondensators bei der Kreisfrequenz  $\omega$  soll im Betrag klein gegen  $r_I$  sein:

$$\omega C r_I \gg 1$$

Diese 5. Bedingung bewirkt, dass der Strom  $i_s$  durch  $P$  keinen merklichen Phasenwinkel gegen den Phasenstrom des Netzes aufweist. Weil der Widerstand  $r_I$  gross gegen den Widerstand des Plättchens ist, wird der Gleichspannungsabfall am Plättchen auch ohne den Kondensator  $C$  nur relativ gering sein. Es ist also auch möglich,  $C$  wegzulassen.

### Einphasenwattmeter für Blindleistung und für Scheinleistung

Wenn in der Schaltung der Fig. 2 der Widerstand  $r_B$  weggelassen wird, ist die Wechselflussdichte  $\Delta B$  proportional zum Integral der Phasenspannung nach der Zeit. Das gleiche gilt für den Wechselflusswiderstand  $R_W$ , also:

$$R_W' = k_U' U_{max} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

In diesem Falle erhält man anstelle der Gl. (5) den Ausdruck:

$$\left. \begin{aligned} u_s' &= i_s (R_W' + R_B) = \\ &= k_U' k_I U_{max} I_{max} \cdot \frac{1}{2} \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) - \\ &- k_U' k_I U_{max} I_{max} \cdot \frac{1}{2} \cos\left(2\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) + \\ &+ k_I I_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) R_B \end{aligned} \right\} (7)$$

Offenbar ist jetzt der Gleichspannungsanteil  $u_{s0}'$  von  $u_s'$  proportional zur Blindleistung, welche in der Impedanz  $Z$  verbraucht wird. Damit dies mit genügender Näherung gilt, müssen die erwähnten Bedingungen 2., 3. und 4. auch hier erfüllt sein. Ausserdem muss als erste Bedingung die Gl. (6) mit guter Näherung gelten.

Auch diesmal wieder können geeignete Spannungs- und Stromwandler benützt werden.

Zur Erzeugung einer Gleichspannung an den Klemmen des Halbleiterplättchens, welche zur Wirkleistung proportional ist, die in  $Z$  verbraucht wird, kann auch die in Fig. 3 gezeichnete Schaltung benützt werden.

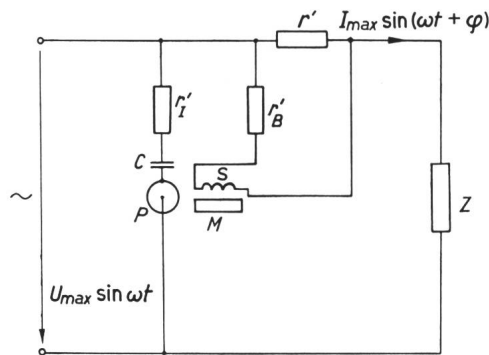


Fig. 3  
Schaltung zum gleichen Zweck wie in Fig. 2

Nach dieser Schaltung ist die Wechselflussdichte  $\Delta B$  proportional zum Phasenstrom  $I_{max} \sin(\omega t + \varphi)$  und der Strom durch das Plättchen  $P$  proportional zur Phasenspannung  $U_{max} \sin \omega t$ . Somit gilt:

$$\left. \begin{aligned} R_W'' &= k_I'' I_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \\ i_s'' &= k_U'' U_{max} \cdot \sin \omega t \end{aligned} \right\} (8)$$

Für die Spannung  $u_s''$  an den Klemmen des Plättchens ergibt sich der Ausdruck:

$$\left. \begin{aligned} u_s'' &= k_U'' k_I'' U_{max} I_{max} \cdot \frac{1}{2} \cos \varphi - \\ &- k_U'' k_I'' U_{max} I_{max} \cdot \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \varphi) + \\ &+ k_U'' U_{max} \cdot \sin \omega t \cdot R_B \end{aligned} \right\} (9)$$

Offenbar ist der Gleichspannungsanteil von  $u_s''$  proportional zur Wirkleistung, welche in der Impedanz  $Z$  verbraucht wird. Als Bedingungen gelten jetzt:

1. Die Wechselflussdichte  $\Delta B$  muss zum Phasenstrom nach Amplitude und Phase proportional sein;
2. Der Strom  $i_s''$  muss zur Phasenspannung nach Amplitude und Phase proportional sein;

3.  $i_s''$  muss nicht vom Widerstand des Plättchens abhängen;
4. Die in der Spule  $S$  sowie in den Widerständen  $r_{B'}$  und  $r'$  verbrauchte Leistung muss vernachlässigbar sein gegen jene, welche in  $Z$  verbraucht wird;
5. Der Kondensator  $C$ , welcher verhindert, dass ein Gleichstrom über  $r_{I'}$  fließt, muss der Bedingung  $\omega C r_{I'} \gg 1$  genügen.

Diese Bedingungen können durch geeignete Wahl der Widerstände  $r_{I'}$ ,  $r_{B'}$  und  $r'$  erfüllt werden.

Auch in dieser Schaltung können geeignete Spannungs- und Stromwandler verwendet werden.

In jeder der oben behandelten Schaltungen ist die Amplitude des Spannungsanteils mit der Kreisfrequenz  $2\omega$  an den Klemmen des Plättchens proportional zur Scheinleistung, welche von  $Z$  absorbiert wird. Wenn man diese Amplitude mit einem frequenzselektiven Voltmeter misst, kann somit diese Scheinleistung bestimmt werden.

### Mehrphasenwattmeter

Bei Mehrphasensystemen mit Nulleiter können die erwähnten Schaltungen der Fig. 2 und 3 auf jede Phase angewandt werden. Die Gleichspannungen, welche an den Klemmen der Plättchen für jede Phase entstehen, können dann addiert werden. Die entstehende Gesamtgleichspannung wird proportional zur Wirk- bzw. Blindleistung des Mehrphasennetzes. Dies soll am Beispiel eines Dreiphasennetzes mit Nulleiter näher erörtert werden.

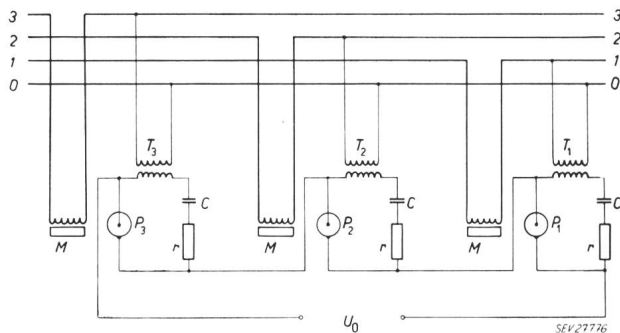


Fig. 4

Schaltung zur Messung der Wirkleistung in einem Dreiphasennetz mit Nulleiter mit Hilfe von drei Halbleiterplättchen  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$ , welche durch drei Spannungswandler  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  gespeist werden

Die Gleichspannung  $U_0$  ist proportional zur genannten Wirkleistung

In Fig. 4 ist ein Wattmeter für Wirkleistung gezeichnet worden. Die drei Halbleiterplättchen  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  werden von den drei Spannungswandlern  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  jeweils über den Reihenwiderstand  $r$  und den Kondensator  $C$  gespeist. Der Widerstand  $r$  ist gross gegen den Widerstand  $R_B$  des Plättchens und genügt der Bedingung  $\omega r C \gg 1$ . Hiedurch ist der Strom durch jedes Plättchen vom Widerstand dieses Plättchens unabhängig und weiterhin proportional zu und gleichphasig mit der betreffenden Phasenspannung. Die magnetische Wechselflussdichte wird proportional zum Phasenstrom und die Flussdichte  $B$  wird vom permanenten Magneten  $M$  erzeugt. Offenbar

ist für jede Phase die Schaltung der Fig. 4 gleichwertig mit jener der Fig. 3. Die für Fig. 3 aufgestellten Bedingungen gelten auch für die Schaltung in Fig. 4. Die resultierende Gleichspannung  $U_0$  der drei Halbleiterplättchen wird mittels eines hochohmigen Voltmeters gemessen. Der hohe Widerstand dieses Voltmeters verhindert einen merklichen Nebenschluss zu den Plättchen. Die Gleichspannung  $U_0$  ist proportional zur Wirkleistung des Verbrauchers.

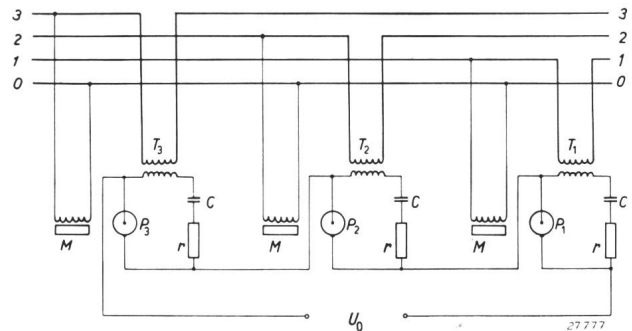


Fig. 5

Schaltung zur Messung der Blindleistung in einem Dreiphasennetz mit Nulleiter

Die Plättchen  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  werden von den drei Stromwandlern  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  gespeist. Die Gleichspannung  $U_0$  ist zur genannten Blindleistung proportional

Zur Messung der Blindleistung in einem Dreiphasennetz mit Nulleiter kann die Schaltung der Fig. 5 verwendet werden. Jetzt wird die magnetische Wechselflussdichte von der Phasenspannung erzeugt. Hiedurch gilt die Gl. (6). Die Plättchen werden von je einem Stromwandler gespeist. Hiedurch gilt die Gl. (7) und die Gesamtgleichspannung  $U_0$  wird proportional zur Blindleistung des Netzes. Die Bedingungen entsprechen jenen, die im Anschluss an die Gl. (6) und (7) erwähnt wurden.

Allgemein sei bemerkt, dass die Kondensatoren  $C$  fortgelassen werden können, falls die Widerstände  $r$  genügend gross gegen die Widerstände  $R_B$  der Plättchen sind. Die Gleichströme, welche durch  $r$  fließen, können dann vernachlässigt werden.

### Kompensierung von Temperatureffekten

Bei Verwendung von Indiumantimonid hängen  $R_B$  und  $R_W$  stark von der Temperatur ab. Bei Indiumarsenid weniger stark, aber doch so, dass eine Kompensierung dieser Temperaturabhängigkeit für eine befriedigende Leistungsmessung unumgänglich ist.

In Fig. 6 ist der Widerstand einer Rechteckscheibe aus Indiumantimonid als Funktion der Temperatur dargestellt worden bei verschiedenen Werten der transversalen magnetischen Flussdichte. Aus den Kurven geht hervor, dass dieser Widerstand als Funktion der Temperatur im Bereich zwischen den vertikalen Geraden  $A$  und  $B$  angenähert durch eine Exponentialfunktion dargestellt werden kann. Die Kurven der Fig. 7 sind aus jenen der Fig. 6 ermittelt worden. Aus diesen Kurven geht hervor, dass sowohl  $R_B$  als auch  $R_W$  sich im Temperaturbereich von z. B.  $-20...+60^\circ\text{C}$  stark ändern, nämlich etwa im Verhältnis 1 : 5. In



Fig. 8 ist der Widerstand einer Rechteckscheibe aus Indiumarsenid als Funktion der Temperatur bei der magnetischen Flussdichte gleich Null dargestellt wor-

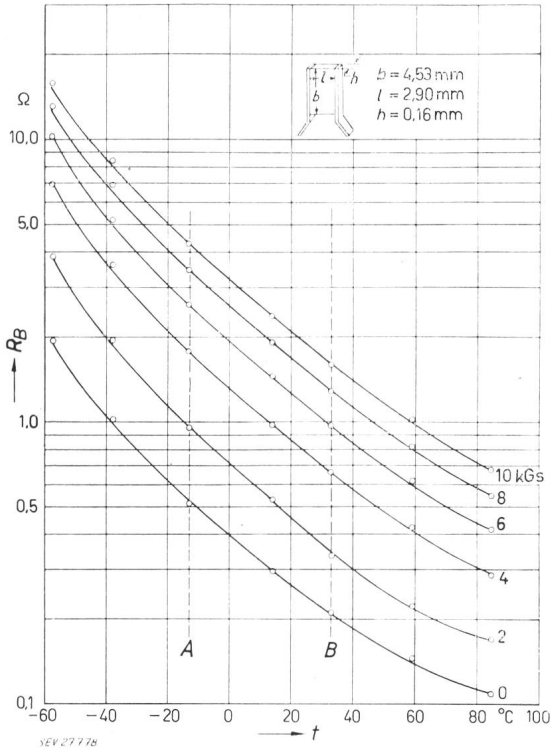


Fig. 6

Widerstand  $R_B$  eines rechteckigen Indiumantimonid-Plättchens als Funktion der Temperatur  $t$  bei verschiedenen Werten der transversalen magnetischen Flussdichte  $B$  in kGs

Zwischen den Geraden A und B ist die Temperaturabhängigkeit von  $R_B$  angenähert durch eine Exponentialfunktion gegeben

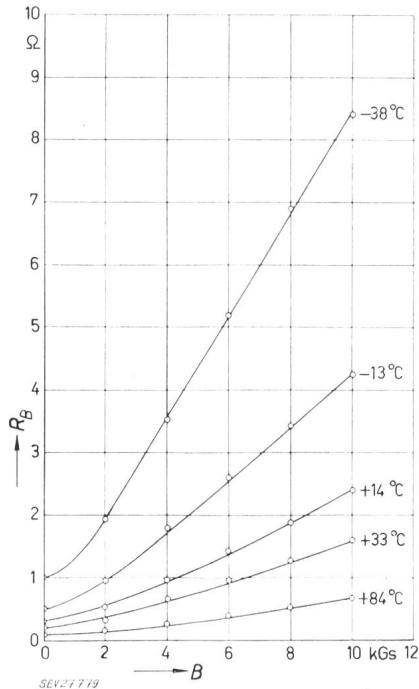


Fig. 7

Widerstand  $R_B$  des gleichen Plättchens, wie in Fig. 6, als Funktion der transversalen magnetischen Flussdichte in kGs bei verschiedenen Temperaturen

Diese Kurven sind aus jenen der Fig. 6 ermittelt worden

den. Es ist ersichtlich, dass dieser Widerstand sich weniger stark ändert als im Fall von Indiumantimonid.

Bei der Kompensierung dieser Temperatureffekte beziehen wir uns zunächst auf Gl. (4). Offenbar bewirkt eine Temperaturänderung primär eine Änderung von  $k_U$ , während  $k_I$  konstant bleibt, denn nach der 3. erwähnten Bedingung hängt  $i_s$  nicht vom Widerstand des Plättchens ab. Es kommt darauf an, dass das Produkt  $k_U k_I$  konstant bleibt, wenn die Temperatur sich

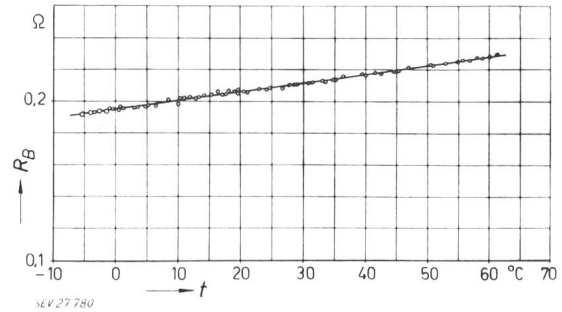


Fig. 8

Widerstand eines rechteckigen Plättchens aus Indiumarsenid als Funktion der Temperatur bei einer magnetischen Flussdichte gleich Null

ändert. Weil  $k_U$  sich ändert, muss bei der Kompensierung eine solche Änderung von  $k_I$  erzielt werden, dass das Produkt  $k_U k_I$  möglichst konstant ist im betrachteten Temperaturbereich. Damit eine Änderung von  $k_I$  bei einer Temperaturänderung stattfinden kann, ist es notwendig, die Schaltungen der Fig. 2 und 3 in bezug auf den Stromweg durch das Plättchen zu ändern. Bei steigender Temperatur und konstanter Wechselflussdichte  $\Delta B$  nimmt nach Fig. 6 und 7 der Wert  $R_W$  ab. Somit nimmt auch  $k_U$  ab. Damit  $k_U k_I$  konstant bleibt, muss  $k_I$  bei steigender Temperatur zunehmen. Dies kann durch die Schaltung in Fig. 9 bewirkt werden. Im

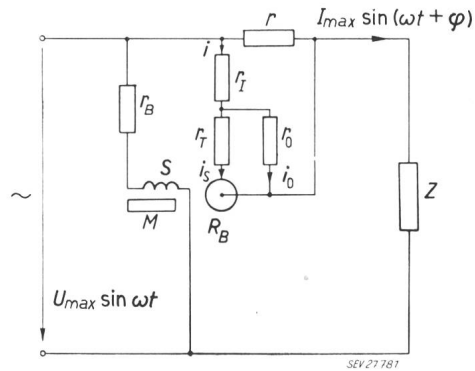


Fig. 9

Schaltung zur Kompensierung der Temperaturabhängigkeit der Wattanzeigen der Schaltungen in Fig. 2, 3, 4 und 5

Vergleich mit der Schaltung in Fig. 2 ist der Widerstand  $r_T$  in Reihe mit dem Plättchen (Widerstand  $R_B$ ) hinzugekommen und parallel zur Reihenschaltung von  $r_T$  und  $R_B$  noch der Widerstand  $r_0$ . Der Widerstand  $r_T$  ist gross gegen  $R_B$ , während  $r_0$  von gleicher Grössenordnung wie  $R_B$  ist. Der Widerstand  $r_I$  ist wieder gross gegen  $R_B$ , wie auch schon in Fig. 2.

Wie aus Fig. 6 ersichtlich, ist die Temperaturabhängigkeit von  $R_W$  [vgl. Gl. (2)] nicht stark verschieden von derjenigen des Widerstandes  $R_B$  des Plättchens bei einer bestimmten Flussdichte  $B$ . Dies kann aus dem

annähernd parallelen Verlauf der Widerstands-Temperaturkurven für verschiedene Werte der Flussdichte  $B$  geschlossen werden. Der Widerstand  $r_T$  ist aus dem gleichen Material angefertigt wie das Plättchen. Es ist  $r_T \gg R_B$ . Der Strom  $i_s$  wird also fast ausschliesslich von  $r_T$  bestimmt. Der Widerstand  $r_0$  ist nur wenig von der Temperatur abhängig, und es ist  $r_0 \ll r_T$ . Somit ist  $i_0 \gg i_s$ . Der Strom  $i$  wird fast ausschliesslich von  $r_I$  bestimmt und es gilt  $i \approx i_0$ . Der Strom  $i_s$  wird angenähert durch die Gleichung:

$$i_s \approx i \frac{r_0}{r_T}$$

bestimmt. Da  $i$  von der Temperatur unabhängig ist, bedingt der Quotient  $r_0/r_T$  den Temperaturgang von  $i_s$ . Offenbar steigt  $i_s$  mit steigender Temperatur. Somit steigt auch  $k_I$  mit wachsender Temperatur, und zwar angenähert nach dem Ausdruck  $r_0/r_T$ . Der Temperaturgang von  $R_W$  und somit von  $k_U$  ist etwa der gleiche wie jener von  $R_B$  nach Fig. 6. Der Temperaturgang von  $r_T$  ist der gleiche wie jener von  $R_B$ . Somit wird der Temperaturgang von  $k_I$  angenähert gleich jenem von  $1/R_B$ . Angenähert ist also das Produkt  $k_U k_I$  von der Temperatur unabhängig. Es hat sich als möglich erwiesen, in einem gegebenen Temperaturbereich den Temperaturgang von  $k_I$  so zu gestalten, dass das Produkt  $k_U k_I$  temperaturunabhängig wird. Hierzu muss auch  $r_0$  einen geringen Temperaturgang erhalten. Das Verfahren ist analog demjenigen, welches früher im Falle der Halleffektwattmeter ausführlich dargelegt wurde [2; 3].

Auch im Falle eines Plättchens aus Indiumarsenid (Fig. 8) ist es möglich, in analoger Weise, wie beschrieben, das Produkt  $k_U k_I$  nahezu temperaturunabhängig zu gestalten, innerhalb eines gegebenen Temperaturbereiches. Letzterer kann in beiden Fällen z. B. von  $-20...+60^\circ\text{C}$  gewählt werden.

Durch den Strom  $i_s$  kann das Plättchen erhitzt werden, was auch wieder zu einer Änderung von  $k_U$  führt. Auch der Widerstand  $r_T$  wird erhitzt. Es muss nun die Temperaturkompensation so gewählt werden, dass auch dieser Effekt möglichst gut kompensiert wird. Der Strom  $i_s$  wird günstigerweise so klein gehalten, dass die genannte Erhitzung gering ist.

### Grössenordnung der Gleichspannungen am Halbleiterplättchen

Aus der Fig. 7 kann geschlossen werden, dass für das betreffende Indiumantimonidplättchen der Wert  $R_W$  bei  $\Delta B = 2$  kGs und  $B = 6$  kGs für Zimmertemperatur etwa  $0,4 \Omega$  beträgt. Bei einem Kreisplättchen mit Kontakten im Zentrum und am Umfang ist  $R_W$  bedeutend grösser (Fig. 1). Wir wollen mit  $R_W = 0,5 \Omega$  bei  $\Delta B = 2$  kGs rechnen. Der Wert  $\Delta B = 2$  kGs bei  $B = 6$  kGs gibt auch ungefähr die Grenze des verwendbaren linearen Bereichs der Kurven nach Fig. 7 an.

Der Strom  $i_s$  durch das Plättchen muss so gewählt werden, dass keine ungünstige Erwärmung auftritt. Für das Plättchen der Fig. 7 kann diese Höchststromampli-

tude  $i_s$  zu etwa  $0,2$  A festgesetzt werden. Wir erhalten in diesem Fall eine Spannung von etwa  $0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,2 = 0,05$  V. Das ist der Höchstwert, welcher in diesem Beispiel zu erwarten ist. Die Gleichspannung kann somit zwischen  $0$  und etwa  $50$  mV liegen.

Für Regelzwecke in Elektrizitätsnetzen ist es nützlich, dass die Wirkleistung durch eine Gleichspannung angezeigt wird. Man kann diese Spannung für Regelzwecke benützen. Hierbei ist zu bedenken, dass nicht die ganze verfügbare Gleichstromleistung des Plättchens verwendet werden kann, sondern nur ein sehr geringer Teil dieser Leistung. Wie erwähnt liegt die höchstverfügbare Gleichstromleistung bei einer Spannung von  $50$  mV und  $R_B \approx 1 \Omega$  etwa in der Grössenordnung  $600 \mu\text{W}$ . Hievon können wir nur etwa  $1\%$  verwenden. Sonst würde infolge der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes  $R_B$  die Gleichspannung an den Klemmen des Plättchens nicht mehr bei jeder Temperatur genau zur Netzleistung proportional sein. Diese Überlegungen sind analog wie sie früher für Halleffektwattmeter angestellt wurden [2; 3]. Somit stehen höchstens einige  $\mu\text{W}$  zur Verfügung. Diese geringe Regelleistung kann aber einige tausend mal verstärkt werden mit Hilfe eines geeigneten magnetischen Verstärkers. Auch diese Überlegungen wurden bereits früher [2; 3] ausführlich erörtert. Mit Hilfe einer so erhaltenen Gleichstromleistung von einigen mW können Regelungen auch auf grössere Distanzen durchgeführt werden.

### Frequenzverhalten, Hochfrequenzwattmeter

In vielen praktischen Fällen ist es erwünscht, Wirk- und Blindleistung bei höheren Frequenzen als  $50$  Hz zu messen. Die beschriebenen Wattmeter eignen sich für diese Zwecke in gewissen Grenzen. In erster Linie muss untersucht werden, in welchen Grenzen  $R_B$  und  $R_W$  von der Frequenz des verwendeten Wechselstromes und von der Frequenz des verwendeten Wechselstromes abhängig sind.

Messungen mit Hilfe von Plättchen mit analogen Abmessungen, wie in Fig. 6 angegeben, haben gezeigt, dass bis etwa  $10$  MHz die Frequenzabhängigkeit von  $R_B$  gering ist. Für höhere Frequenzen sind Frequenzabhängigkeiten festgestellt worden. Bei  $300$  MHz ist  $R_B$  für  $6$  kGs z. B. auf die Hälfte und bei  $600$  MHz auf ein Drittel des bei  $0$  Hz gemessenen Wertes gesunken [5].

Neuere, noch unveröffentlichte Messungen im Institut für höhere Elektrotechnik der ETH haben gezeigt, dass unter bestimmten Bedingungen bei Kreisscheiben mit einem zentralen und einem Umfangskontakt die Frequenzabhängigkeit von  $R_B$  und von  $R_W$  viel geringer ist. Jedenfalls kann heute bereits gesagt werden, dass bis etwa  $10$  MHz hinauf Wattmeter nach diesen Schaltungen einwandfrei arbeiten können. Es ist wahrscheinlich, dass diese Grenze bis  $300$  MHz erhöht werden kann.

Das Halbleiterplättchen befindet sich in einem transversalen magnetischen Wechselfeld. Speziell im Fall

einer Kreisscheibe mit zentralem und Umfangskontakt (oberste Kurve der Fig. 1) ist in diesem magnetischen Wechselfeld eine Kurzschlusswindung vorhanden, welche Leistung absorbiert. Dieser Leistungsverlust kann dadurch verringert werden, dass der Umfangskontakt der Scheibe unterteilt wird. Ein Beispiel hierfür, mit einer Zweiteilung, ist in Fig. 10 dargestellt. Die Enden der beiden Kontakthalbkreise sind übers Kreuz miteinander verbunden. An Stelle von einer Zweiteilung kann auch eine Vierteilung usw. des Umfangskontaktes vorgenommen werden. Hierdurch wird die Leistungsabsorption noch weiter verringert.

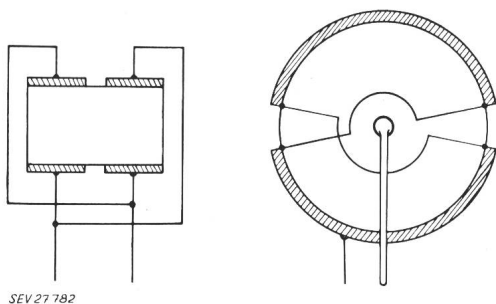


Fig. 10

Unterteilung der Kontakte bei Halbleiterplättchen zur Vermeidung von Wirbelstromverlusten

Auch bei einem Plättchen nach Fig. 6 oben kann ein Leistungsverlust auftreten infolge Leistungsabsorption in den Kontakten. Eine Unterteilung der Kontakte, z. B. nach Fig. 10, führt auch hier zu einer Verringerung dieses Leistungsverlustes.

Die Verbindungsleitungen der verschiedenen Kontaktabschnitte werden vorzugsweise in Flächen verlegt, welche parallel zu den magnetischen Feldkurven verlaufen.

#### Vergleich mit Hallwattmetern

Beim Vergleich der hier beschriebenen Gausseffektwattmeter mit den früher behandelten Halleffektwattmetern [1; 2; 3] kann hervorgehoben werden, dass im zweiten Fall an jedem Plättchen vier, oder mindestens doch drei Kontakte erforderlich sind, im ersten Fall jedoch nur zwei. Es ist klar, dass die Schaltungen der

Gausswattmeter daher einfacher sind als jene der Hallwattmeter.

Bei der Herstellung der Plättchen für die Hallwattmeter müssen vier, bzw. drei Kontakte angelötet werden, bei den Gausswattmeterplättchen dagegen nur zwei. Diese Lötarbeit ist nicht immer einfach; die Verringerung der Kontaktzahl bedingt daher eine nicht zu vernachlässigende Vereinfachung bei der Herstellung der Plättchen. Wenn Hallplättchen mit 4 Kontakten verwendet werden, ist beim Anlöten dieser Kontakte auf besondere Symmetrieforderungen in bezug auf ihre Anordnung zu achten. Auch diese Komplikation fällt bei Gausswattmeterplättchen fort.

Bei höheren Frequenzen ist es erforderlich, im Messkreis bestimmte Erdungen (Verbindungen mit dem Gehäuse) vorzunehmen. Diese Erdung ist bei zwei Kontakten einfach, indem einer der Kontakte geerdet wird. Bei drei oder vier Kontakten können jedoch Schwierigkeiten entstehen.

Die Grössenordnungen der Anzeigespannungen und Gleichstromleistungen der Messgeräte sind in beiden Fällen ungefähr gleich.

Die Temperaturkompensation ist vielleicht bei den Gausswattmetern als etwas einfacher zu bezeichnen.

#### Literatur

- [1] Hartel, W.: Anwendung der Hallgeneratoren. Siemens Z. Bd. 28 (1954), Nr. 8, S. 376...384.
- [2] Sun, S. F.: Power Measurement and Power Regulation in Multi-Phase Networks by Means of Semiconductors. Diss. ETH Nr. 2518. Zürich: Speich 1955.
- [3] Strutt, M. J. O. und S. F. Sun: Leistungsmessung und Leistungsregulierung in Mehrphasennetzen mittels Halbleitern. Arch. Elektrotechn. Bd. 42 (1955/56), Nr. 3, S. 155...164.
- [4] Welker, H.: Neuere Untersuchungen der Halbleitereigenschaften von III-V-Verbindungen. Scientia electr. Bd. 1 (1954), Nr. 4, S. 152...164.
- [5] Ramer, P., M. J. O. Strutt und F. K. von Willisen: Messungen des Gausseffektes verschiedener Halbleiter bei 19, 399 und 699 MHz. AEÜ Bd. 11 (1957), Nr. 1, S. 1...7.
- [6] Strutt, M. J. O.: Einrichtung zur messtechnischen Ausnutzung des Gausseffektes mit Hilfe eines in einem Magnetfeld ausgesetzten Gauss-Generators. Deutsches Bundes-Patent 1.999.024 vom 2. Juli 1955, im Besitze der AG Brown, Boveri & Cie., Baden.

#### Adressen der Autoren:

Prof. Dr. techn., Dr.-Ing. h. c. M. J. O. Strutt, und Dr. sc. techn. S. F. Sun, Institut für höhere Elektrotechnik der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 7/6.

## Die Korrektur nichtlinearer Übertragungsfehler von Farbfernseh-Systemen

Von E. Baumann, Zürich

621.397.9:621.397.813

*Das Farbfernsehen stellt an die Übertragungsgeräte bedeutend schärfere Forderungen bezüglich der Linearität als das Schwarz-Weiss-Fernsehen. Mit Hilfe der von Volterra eingeführten Linienfunktion werden die Korrekturmöglichkeiten von bestehenden oder von neuen Übertragungssystemen studiert.*

*La télévision en couleurs pose aux appareils de transmission des exigences beaucoup plus sévères que la télévision en noir et blanc. A l'aide de la fonction linéaire introduite par Volterra, l'auteur examine les possibilités de correction de systèmes de transmission existants, ou nouveaux.*

Das Videosignal dient zur elektrischen Übertragung eines Fernsehbildes. Es ist eine Zeitfunktion, etwa  $u_1(t)$ . Die Variable  $t$  ist, gemäss dem gewählten Abtastsystem, in gesetzmässiger Weise mit den geometrischen (Orts-) Koordinaten des Bildes verknüpft. Ein Zeitelement  $dt$  entspricht einem geometrischen Bild-

element. Der Augenblickswert von  $u_1(t)$  trägt die Information, die den der Zeit  $t$  zugeordneten Bildpunkt charakterisiert.

Zur Übertragung eines Schwarz-Weiss-Bildes genügt eine einzige Zeitfunktion, die die Helligkeitsverteilung im Bilde darstellt. Farbige Bilder verlangen hingegen