

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	72 (1981)
Heft:	9
Artikel:	Probleme der exakten Messung der elektrischen Energie im Netz bei Anwesenheit von Oberwellen im Strom
Autor:	Tschappu, F.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-905108

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: 26.01.2026

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

Probleme der exakten Messung der elektrischen Energie im Netz bei Anwesenheit von Oberwellen im Strom

Von F. Tschappu

621.3.014.08;

1. Einleitung

Die Zusammenhänge zur Ermittlung der elektrischen Wirkleistung und Wirkenergie bei sinusförmigen Spannungen und Strömen sind jedem Spezialisten bekannt, der sich mit den Problemen der elektrischen Messtechnik befasst. Anders liegen die Dinge bei nicht rein sinusförmigen Spannungen und Strömen. Dort sind die Leistungsverhältnisse in den elektrischen Versorgungsnetzen wesentlich komplizierter und unübersichtlicher. Auch über die Größenordnungen der Grund- und Oberwellenleistungen und deren Konsequenzen auf die Leistungs- und Energiemessung macht man sich meistens keine richtigen Vorstellungen.

Die nachfolgenden Erläuterungen verfolgen den Zweck, die Leistungsflussverhältnisse bei Oberwellen in Spannung und Strom im Netz zu analysieren. Anhand von praktischen Beispielen werden auch die Größenordnungen der Leistungsflüsse der verschiedenen Ordnungszahlen in den Messkreisen und ihre Auswirkungen auf die Messeigenschaften der Wirkenergiemessung mit Induktionszählern sowie mit Zählern mit statischen Messwerken behandelt.

2. Verlauf der Wirkleistung

2.1 Sinusförmige Spannungen und Ströme

In Figur 1 sind die Verhältnisse bei sinusförmigen Spannungen und Strömen, d.h. bei linearer Belastung, dargestellt. Der Strom ist gegenüber der Spannung um den Phasenwinkel φ verschoben. Der Augenblickswert p der Leistung schwingt mit doppelter Netzfrequenz um einen Mittelwert P , der der Wirkleistung $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ entspricht. Für U und I sind die Effektivwerte einzusetzen.

Der Aufsatz ist eine überarbeitete Fassung des Vortrages vom 8. Januar 1980 im Rahmen des Kolloquiums des Institutes für elektrische Anlagen und Energiewirtschaft an der ETHZ.

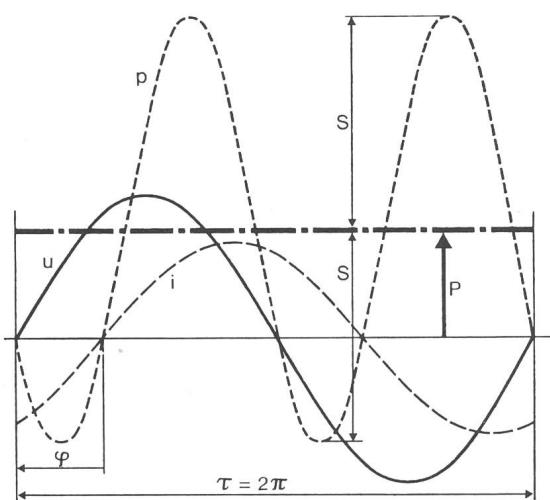


Fig. 1 Zeitlicher Verlauf der Leistung bei sinusförmigen Spannungen und Strömen

- u Zeitlicher Verlauf der Spannung
- i Zeitlicher Verlauf des Stromes
- φ Phasenwinkel zwischen I und U
- p Zeitlicher Verlauf der Leistung $p = u \cdot i$
- P Zeitlicher Mittelwert von p , Wirkleistung $= U \cdot I \cdot \cos \varphi$
- S Amplitude der Schwingung um P , Scheinleistung $= U \cdot I$

2.2 Oberwellen in der Netzspannung und lineare Belastung

Enthält die Generatorenspannung Oberwellen, und ist die Last linear, d.h. die Lastimpedanz unabhängig von U und I , dann ist bei nichtohmscher Belastung das Verhältnis der Oberwellen zur Grundwelle bei U und I nicht gleich, da die Last frequenzabhängig ist. Für diesen allgemeinen Fall berechnet sich die Wirkleistung nach Gl. (8) bzw. (6) + (7) (vgl. Anhang). Bei ohmscher Belastung ist hingegen das Verhältnis der Oberwellen zur Grundwelle von U und I gleich gross. Die Wirkleistung berechnet sich in diesem Falle zu $P = U \cdot I = U^2/R$. Da die bezogene Energie in Wärme umgewandelt wird, muss auch hier für U und I der Effektivwert eingesetzt werden.

Typisch für diesen Fall ist, dass das Verhältnis der Oberwellen zur Grundwelle von U und I in derselben Größenordnung liegt.

2.3 Sinusförmige Spannung und nichtlineare Belastung

Die Generatorenspannung sei sinusförmig. Die Verzerrungen werden durch nichtlineare Verbraucher im Strom verursacht. Diese bilden eine eingeprägte Stromoberwellenquelle. Die Oberwellen in der Netzspannung werden von den Stromoberwellen als Spannungsabfall an der Leitungsimpedanz Z_L vom Generator zur Meßstelle gebildet und sind in allen Fällen um mehrere Größenordnungen kleiner als im Strom.

Nichtlineare Verbraucher sind beispielsweise: Thyristorgesteuerte Regelgeräte (Phasenanschnitt-, Schwingungspaket-, Pulszeitsteuerungen) [2], Fluoreszenzbeleuchtung, Fernsehapparate, Mikrowellenherde, gesteuerte Drehstrom-Gleichrichteranlagen, Batterieladegeräte usw. Mit den modernen Thyristor-Halbleiterschaltungen kann die Leistung auf verschiedene Arten stufen- und verlustlos gesteuert werden. Je nach Art und Grösse der Regulierung entsteht ein mehr oder weniger ausgeprägtes Oberwellenspektrum im Strom [1; 2].

Entsprechend ihrer Bedeutung für die Energieversorgung werden nachfolgend nur die Verhältnisse im Netz bei sinusförmiger Generatorenspannung und nichtlinearer Belastung behandelt.

3. Leistungsflüsse im Messkreis

Zur Analyse der Leistungsflüsse wird ein Messkreis nach Figur 2 angenommen. Der Generator G bildet eine sinusförmige Spannungsquelle und speist über die Leitungsimpedanz Z_L eine ohmsche Belastung. Die Last werde mit einem TRIAC gesteuert.

In Figur 3 ist das Grundwellenschema dargestellt. Der Generator liefert über die Meßstelle A die Grundwellenleistung P_{a1} , die zum grossen Teil als P_{b1} zum Verbraucher und zum kleinen Teil als P_{th1} zum TRIAC fliesst, der diesen Anteil in Oberwellenleistung umwandelt. Deshalb kommt im Grundwellenschema symbolisch das Leistungs/Übersetzungs-Verhältnis \ddot{u}_L von Grund- zu Oberwellenleistung vor. Zusätzlich liefert der Generator noch die Grundwellenleistung P_{L1} an den ohmschen Widerstand R_L der Leitungsimpedanz Z_L .

In Fig. 4 ist das Oberwellenschema dargestellt. Da der Generator nur Grundwellenleistung liefern kann (seine Spannung ist sinusförmig), kommt er im Oberwellenschema nicht

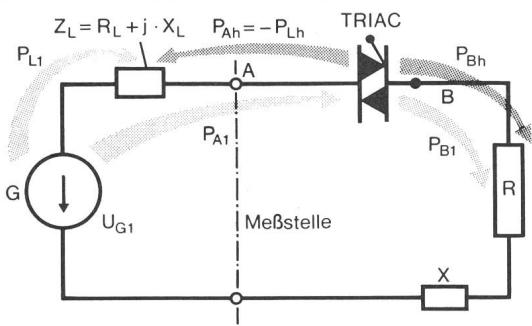


Fig. 2 Verlauf der Leistungsflüsse im Messkreis

- U_{G1} Generatorenspannung, sinusförmig
- Z_L Leitungsimpedanz, R_L Anteil ohmscher Widerstand
- $Z = R + j \cdot X$ Lastimpedanz, R Anteil ohmscher Widerstand
- Triac Nichtlineares Schaltelement
- P_{A1} Vom Generator an den Triac gelieferte Grundwellenleistung
- P_{L1} Vom Generator an den ohmschen Widerstand R_L der Leitungsimpedanz gelieferte Grundwellenleistung
- P_{Ah} Vom Triac zurück an R_L gelieferte Oberwellenleistung
- P_{B1} Vom Triac an den Verbraucher R gelieferte Grundwellenleistung
- P_{Bh} Vom Triac an den Verbraucher R gelieferte Oberwellenleistung

vor. An seine Stelle tritt der TRIAC als eingeprägte Stromoberwellenquelle. Er wandelt die vom Generator bezogene Grundwellenleistung P_{Th1} in Oberwellenleistung um und liefert einen kleinen Teil davon als P_{Ah} über die Meßstelle A zurück an den ohmschen Widerstand R_L von Z_L und den grösseren Teil als P_{Bh} an den Verbraucher R . Da R_L und R in Serie geschaltet sind, beträgt das Verhältnis $P_{Bh}/P_{Ah} = R/R_L$.

Die Gesamtverluste P_L im ohmschen Widerstand R_L der Leitung setzen sich somit zusammen aus der vom Generator gelieferten Grundwellenleistung P_{L1} und dem vom TRIAC aus der Grundwellenleistung P_{A1} in Oberwellenleistung umgewandelten Anteil P_{Ah} (Fig. 2). Die Grund- und Oberwellenströme setzen sich quadratisch zum Effektivwert des Gesamtstromes I nach Gl. (3) zusammen, und die Leistung $P_L =$

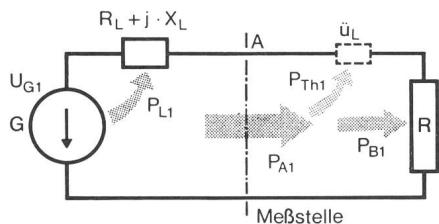


Fig. 3 Grundwellenersatzschema

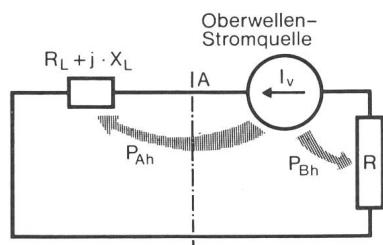


Fig. 4 Oberwellenersatzschema

$I^2 \cdot R_L$ wird in Wärme umgewandelt. Da dieser Verlust erzeugerseitig der Meßstelle A anfällt, geht er zu Lasten des Lieferwerkes. Bei gegebener Leistungsabgabe an den Verbraucher werden die Verluste in der Zuleitung um das Verhältnis P_{Lh}/P_{L1} grösser als bei linearer Belastung (Gl. 13 und 16).

Ein Grossteil P_{Bh} der vom TRIAC aus der Grundwellenleistung P_{A1} umgewandelten Oberwellenleistung fliesst neben der Grundwellenleistung P_{B1} zum Verbraucher. Ob P_{Bh} als Nutz- oder Verlustleistung betrachtet werden muss, hängt von der Art des Verbrauchers ab. Dient die Oberwellenleistung P_{Bh} zur Wärmeerzeugung, so bildet sie ebenfalls einen Nutzanteil. Bei der Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Arbeit, z.B. bei Verwendung eines Drehfeldmotors, verursacht P_{Bh} zusätzliche Erwärmung in Stator- und Rotorwicklung. Der Wirkungsgrad des Motors wird dadurch kleiner. In diesem Falle muss der Oberwellenanteil der zugeführten Leistung als schädlich eingestuft werden.

An der Meßstelle A fliesst die Oberwellenleistung P_{Ah} vom TRIAC zurück in den ohmschen Widerstand R_L der Zuleitung. Sie hat deshalb umgekehrtes Vorzeichen wie die Grundwellenleistung. In Gl. (9) kommt für das Verhältnis P_h/P an der Meßstelle A neben dem Quadrat des Klirrfaktors K_1 im Strom (Gl. 5) noch das Verhältnis R_L/R des ohmschen Widerstandes der Zuleitung zum Verbraucherwiderstand vor. Wie noch an einigen Beispielen gezeigt wird, ist R_L/R in der Praxis sehr klein. Aus diesem Grund bleibt der Anteil Oberwellenleistung bezogen auf die Gesamtleistung an der Meßstelle selbst bei sehr grosser Verzerrung des Stromes ebenfalls klein.

4. Das Zusammenwirken von mehreren Belastungen

Sind mehrere Verbraucher, lineare und nichtlineare, parallel an ein Netz angeschlossen, so werden die Leistungsflussverhältnisse noch um einiges komplizierter, wie die nächsten Beispiele zeigen.

4.1 Parallelschaltung von linearem und nichtlinearem Verbraucher

Ein Generator G speist mit sinusförmiger Spannung über eine Leitung mit der Impedanz Z_L eine Sammelschiene, an der ein nichtlinearer Verbraucher a und ein linearer Verbraucher b parallel geschaltet sind (Fig. 5). Er liefert die Grundwellenleistung P_{L1} zur Deckung der Grundwellenverluste in R_L von Z_L und die Grundwellenleistungen P_{a1} und P_{b1} der Verbraucher a und b. Das nichtlineare Element im Verbraucher a wandelt einen Teil der aufgenommenen Grundwellenleistung um in Oberwellenleistung P_{ah} , welche zurück in die Sammelschiene fliesst. Vom Oberwellenerzeuger a aus gesehen, sind die Leitungsimpedanz Z_L und die Lastimpedanz Z_b von Verbraucher b parallel geschaltet. Da in der Praxis Z_L um mehrere Größenordnungen kleiner als Z_b ist, fliesst der grössste Teil der Oberwellenleistung P_{ah} vom Verbraucher a in den Widerstand R_L , wo sie zusammen mit der vom Generator gelieferten Grundwellenleistung P_{L1} in Wärme umgewandelt wird. Nur ein kleiner Teil von P_{ah} fliesst via Sammelschiene in den linearen Verbraucher b. Für diesen Verbraucher gilt das in 2.2 Gesagte; Grund- und Oberwellenleistung haben dieselbe Richtung.

Der nichtlineare Verbraucher a ist der eigentliche Urheber der Einstreuung von unerwünschter Oberwellenleistung in den linearen Verbraucher b. Das Lieferwerk ist daran nur indirekt beteiligt, da eine Oberwellenleistung an der Sammelschiene

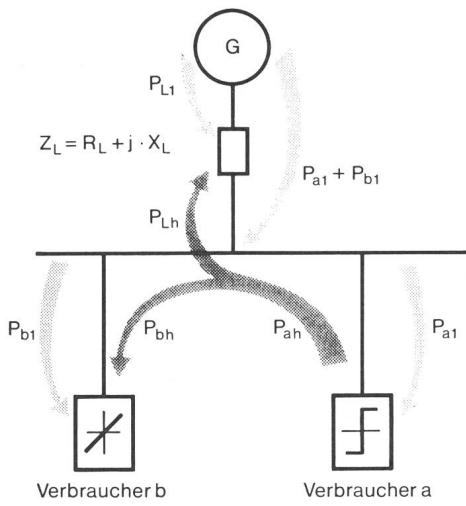


Fig. 5 Verlauf der Leistungsflüsse bei Anwesenheit eines nichtlinearen Verbrauchers a und eines linearen Verbrauchers b im Netz

nur durch das Zusammenwirken eines nichtlinearen Verbrauchers mit einem ohmschen Widerstand R_L der Zuleitung vom Generator zur Sammelschiene zustande kommt.

4.2 Parallelschaltung von zwei nichtlinearen Verbrauchern

Der Grundwellenleistungsfluss im Netz (Fig. 6) ist gleich wie in Fall 4.1. Beide nichtlinearen Verbraucher a und b wandeln einen Teil der bezogenen Grundwellenleistung in Oberwellenleistung P_{ah} und P_{bh} um und liefern sie via Sammelschiene zurück in den ohmschen Widerstand R_L der Zuleitung, wo sie zusammen mit der vom Generator gelieferten Grundwellenleistung P_{L1} in Wärme umgewandelt werden. Dabei wird allerdings vorausgesetzt, dass die harmonischen Spektren der Ströme vom Verbraucher a und b gleich sind. Im allgemeinen ist dies nicht der Fall, so dass noch ein Austausch von Oberwellenleistung analog Fall 4.1 vom stärkeren zum schwächeren Partner überlagert wird («stärker» heisst in diesem Falle «grösserer Oberwellenerzeuger»).

Die Leistungsbezugswertverhältnisse für Oberwellen hängen nicht allein vom betreffenden Leistungsbezug, sondern auch vom Verhalten des parallelgeschalteten nichtlinearen Verbrauchers ab.

5. Gleichphasigkeitsfaktor, Gleichzeitigkeitsfaktor

Je nach der Wirkungsweise des nichtlinearen Schaltelementes im Messkreis ist das Stromspektrum nach Betrag und Phasenlage u.U. sehr unterschiedlich. Es wird deshalb bei mehreren parallelgeschalteten nichtlinearen Verbrauchern eine teilweise Kompensation der Stromoberwellen stattfinden [2; 3].

Der Gleichphasigkeitsfaktor k_p berücksichtigt die unterschiedlichen Phasenlagen der eingespeisten Oberwellenströme. Er gibt das Verhältnis zwischen dem resultierenden Oberwellenstrom und der algebraischen Summe der Oberwellenströme gleicher Ordnungszahl aller zeitgleich im Betrieb befindlichen Geräte an. Analog kann auch ein Gleichzeitigkeitsfaktor k_t für alle im Netz installierten Geräte definiert werden, der das zeitliche Zusammenwirken des Einschaltens aller installierten Geräte ausdrückt. Je kleiner diese beiden Faktoren sind, desto kleiner sind die zeitgleich fliessenden Stromoberwellen bei gegebenen nichtlinearen Verbrauchern.

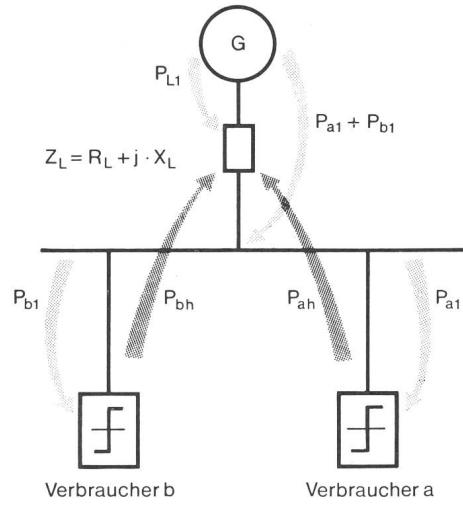


Fig. 6 Verlauf der Leistungsflüsse bei Anwesenheit von zwei nichtlinearen Verbrauchern a und b im Netz

Der Gleichphasigkeitsfaktor k_p hängt von der Art der Leistungssteuerung ab. Beim Zusammenwirken von Geräten mit Phasenanschnittsteuerung wird k_p relativ klein sein, da die Phasenlage der Stromoberwellen u.a. von der Grösse des Anschnittwinkels abhängt. Anders liegen die Dinge, wenn mehrere Fernsehempfänger mit der Schaltung «switched-mode-control» [5] parallel geschaltet sind. Hier sind die Stromoberwellen derselben Ordnungszahl unabhängig vom Grad der Leistungsregulierung (vgl. Abschnitt 7). Der Gleichzeitigkeitsfaktor k_t wird je nach Tageszeit und Wochentag verschiedene Werte annehmen.

Über die Grösse von k_p und k_t sind keine allgemeingültigen Werte vorhanden. Sie hängen von der Art der parallelgeschalteten nichtlinearen Verbraucher und deren zeitlichem Zusammenwirken ab und lassen sich ausschliesslich auf statistischer Basis berechnen.

6. Die Messung der Wirkenergie in Kreisen mit nichtlinearer Belastung

6.1 WAS soll gemessen werden?

Im Messkreis nach Figur 2 sind die verschiedenen Leistungen, die durch die Meßstelle A fliessen, dargestellt. Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob neben der Grundwellenleistung P_{A1} auch die Oberwellenleistung P_{Ah} gemessen werden soll. Folgende Argumente sprechen zugunsten der Messung nur der Grundwellenenergie:

– Ein *nichtlinearer* Verbraucher muss auch die Oberwellen-Energie bezahlen, die er aus der bezogenen Grundwellenenergie umformt und zurück ins Netz schickt. (Die Netzeverbraucher werden zusätzlich zur Kasse gebeten.)

– Ein *linearer* Verbraucher muss die unerwünschte Oberwellenenergie, die er vom nichtlinearen Verbraucher via Sammelschiene mitgeliefert bekommt, nicht bezahlen.

Diese Überlegungen sind an und für sich richtig. Es geht aber, wie noch gezeigt wird, generell um dermassen kleine Werte der Oberwellenleistung an der Meßstelle, dass diese Argumente kein massgebendes Gewicht haben.

Die Messung der Grundwellenenergie allein würde von seiten der Instrumentenhersteller technisch aufwendigere Messinstrumente erfordern, was sich zwangsläufig in höheren

Kosten zur Messung der elektrischen Energie äussern würde. Vom physikalischen Standpunkt aus betrachtet, muss grund- sätzlich die die Meßstelle A durchfliessende elektrische Wirk- energie gemessen werden, die als Nutzenergie verwertet werden kann. Aufgrund dieser Überlegungen soll die *Grund- und Oberwellenenergie* gemessen werden.

6.2 WO soll gemessen werden?

Die Wirkenergie kann entweder vor oder hinter dem nicht- linearen Schaltelement gemessen werden. Der TRIAC nach Figur 2 wirkt als Schalter mit zwei diskreten Schaltzuständen, ideal leitend oder ideal sperrend. Er absorbiert praktisch keine Energie. Die beiden Stellen A und B vor und hinter dem TRIAC unterscheiden sich nur – aber ganz wesentlich – im relativen Anteil der Oberwellenleistung an der gesamten Leistung. Das Verhältnis der Oberwellenleistungen vor und hinter dem TRIAC beträgt nach Gl. (23) R_L/R .

Wenn das verwendete Messinstrument die Wirkenergie unabhängig von der Kurvenform von Spannung und Strom richtig anzeigt, kann es grundsätzlich am Messpunkt A oder B nach Figur 2 eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den Messinstrumenten mit statischen Messwerken messen aber die Induktionszähler die Oberwellenenergie mit Zusatzfehlern, so dass als Meßstelle praktisch nur Punkt A vor dem TRIAC in Frage kommt. Da bei den Abonnenten ausser der betrachteten nichtlinearen Belastung normalerweise auch noch andere Apparate eingeschaltet sind, kommt auch aus diesem Grund nur die Meßstelle A für die Messung der Wirkenergie beim Abnehmer in Frage.

6.3 WIE soll gemessen werden?

Die Abhängigkeit der Messeigenschaften von der Grösse der Netzfreqenz ist bei den Induktionszählern begründet durch die induktive Übertragung der Messgrössen U und I in die Triebsscheibe. Die Grösse der Frequenzabhängigkeit hängt u.a. vom Aufbau und von der Dimensionierung der Messkreise ab. Bei höheren Netzfrequenzen sind negativere Fehler zu erwarten (Fig. 7).

Wie erwähnt, fliesst die vom TRIAC erzeugte Oberwellenleistung z.T. über die Meßstelle A ins Netz zurück und hat umgekehrte Richtung zur Grundwellenleistung. Deshalb messen die Induktionszähler an der Meßstelle A die gesamte Energie mit *positiven* Fehlern.

Im Gegensatz zu den Induktionszählern messen die Zähler mit statischen Messwerken, bei denen die Multiplikation von u und i auf dem Prinzip der Mark-Space-Amplitudenmodulation basiert, die Wirkenergie praktisch unabhängig von der Kurvenform von U und I . Sie können deshalb überall im Netz zur Messung der Grund- und Oberwellenenergie von nichtlinearen Verbrauchern ohne Einbusse an Messgenauigkeit eingesetzt werden.

7. Beispiele zur Abschätzung der Messgenauigkeit

Es wird angenommen, dass für die Messung der Wirkenergie Induktionszähler herkömmlicher Bauart eingesetzt werden.

Da in Gl. (9) zur Berechnung des Verhältnisses der Oberwellenleistung zur gesamten Leistung an der Meßstelle A bei gegebenem Klirrfaktor K_i im Strom noch der Faktor R_L/R vorkommt, müssen für den ohmschen Widerstand R_L der Leitungsimpedanz Z_L , von der auch die Leistungsfähigkeit

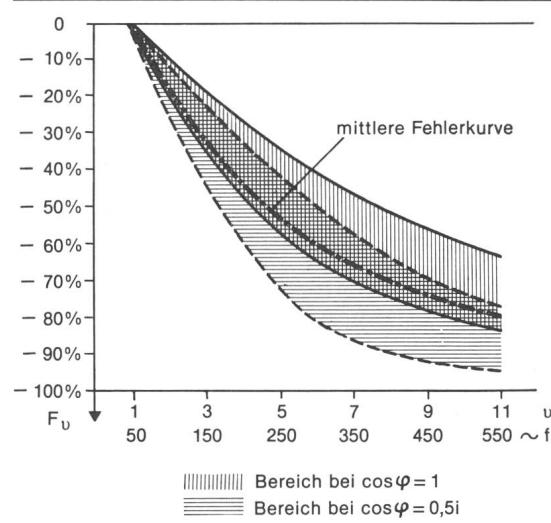


Fig. 7 Abhängigkeit der Messeigenschaften der Induktionszähler von der Netzfreqenz

Die schraffierten Flächen umfassen den Bereich der Frequenz- abhängigkeit der bekanntesten modernen Induktionszähler verschiedener Herkunft

des Versorgungsnetzes abhängt, Zahlenwerte gewählt werden, die den Verhältnissen des Niederspannungsnetzes entsprechen. Gemäss [3] sind die Verhältnisse in den öffentlichen Niederspannungsnetzen noch am einfachsten zu überblicken. So entspricht die Bezugsimpedanz in DIN EN 50006/VDE 0838/10.76 mit $(0,4 + j0,25) \Omega$ der Schleifenimpedanz Außenleiter–Nulleiter, die in den Netzen der Bundesrepublik Deutschland nach dem Stand 1970 für ca. 95 % der Anschlusspunkte der Stromkunden mit dem Netz unterschritten und nur in ca. 5 % aller Fälle überschritten wurde. Hiezu kommt, dass auf der Niederspannungsseite die Leitungskapazitäten praktisch keinen Einfluss haben, so dass keine Gefahr von Resonanzerscheinungen der massgebenden Ordnungszahlen 3 bis 7 besteht.

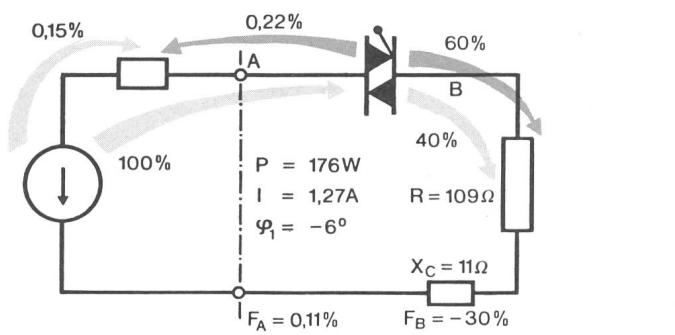
7.1 Fernsehempfänger (Fig. 8)

Aus dem U – I -Diagramm ist ersichtlich, dass die Schaltung des untersuchten Gerätes nach dem Prinzip «switched mode control» ausgelegt ist [5]. Die Grundwellenleistung entspricht nahezu ohmscher Last. Die Leistungsaufnahme bei $U = 220$ V beträgt 176 W bei einem Leistungsfaktor der Grundwelle von 0,995 cap. und der Effektivwert des Stromes 1,27 A.

Aufgrund dieser Daten berechnen sich die Ersatz-Serie- impedanz Z der Belastung zu $109 + j11 \Omega$, das Verhältnis R_L/R zu $0,4/109 = 3,7 \cdot 10^{-3}$ und der Klirrfaktor K_i im Strom nach Gl. (5) zu 0,78. Nach Gl. (9) beträgt das Verhältnis P_h/P an der Meßstelle A $2,2 \cdot 10^{-3}$. Die mittlere gewichtete Ordnungszahl v [2, Kap. 3] beträgt ca. 4 und der daraus resultierende Zusatzfehler der Induktionszähler aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Messwerke nach Gl. (12) ca. + 0,1 %.

7.2 Fluoreszenzbeleuchtung ohne Phasenkompensation

Aus Figur 9 ist ersichtlich, dass der Klirrfaktor K_i im Strom mit 0,07 sehr klein ist. Es treten nur in sehr bescheidenem Massen Stromoberwellen auf. Hingegen ist die Last mit einem Leistungsfaktor 0,44 stark induktiv. Es sind deshalb keine messbaren Fehler an der Meßstelle A zu erwarten.



Klirrfaktor im Strom $K_i = 0,78$

Grundwellen-Leistungen

Oberwellen-Leistungen

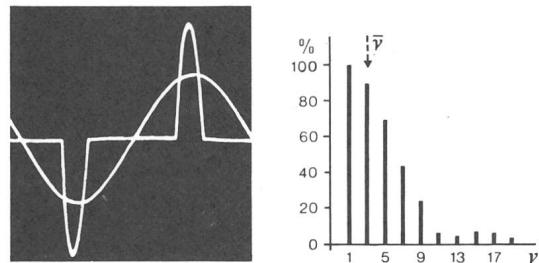
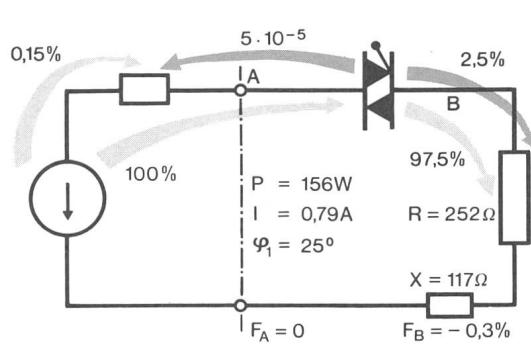


Fig. 8 Belastungsbeispiel Television



Klirrfaktor im Strom $K_i = 0,18$

Grundwellen-Leistungen

Oberwellen-Leistungen

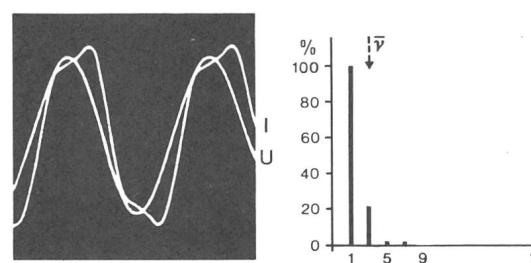
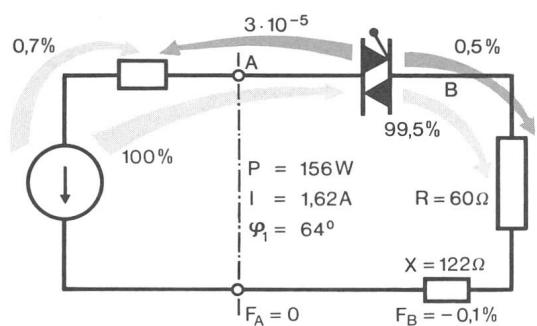


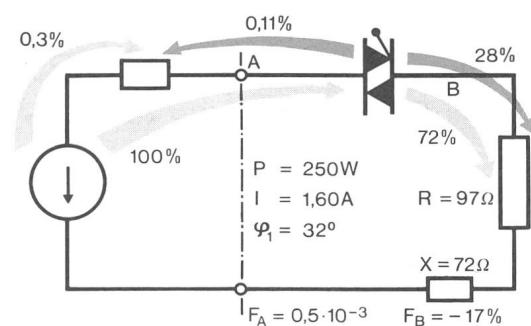
Fig. 10 Belastungsbeispiel Fluoreszenzbeleuchtung mit Kompensation



Klirrfaktor im Strom $K_i = 0,07$

Grundwellen-Leistungen

Oberwellen-Leistungen



Klirrfaktor im Strom $K_i = 0,53$

Grundwellen-Leistungen

Oberwellen-Leistungen

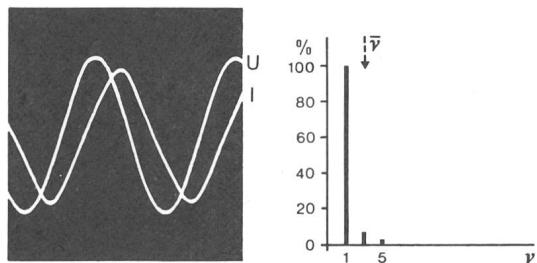


Fig. 9 Belastungsbeispiel Fluoreszenzbeleuchtung ohne Kompensation

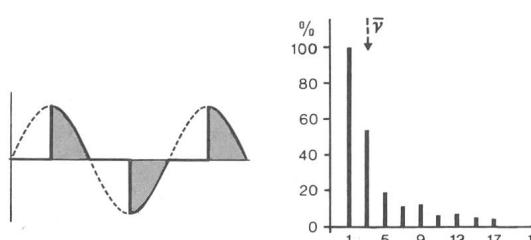


Fig. 11 Belastungsbeispiel Doppelweg-90°-Phasenanschnittsteuerung
Ohmsche Belastung

7.3 Fluoreszenzbeleuchtung mit Phasenkompensation

Der Kompensationskondensator bewirkt eine starke Kompensation der aufgenommenen Blindleistung (Fig. 10). Der Leistungsfaktor steigt von 0,44 auf 0,91 an. Als Nachteil ist die stärkere Verzerrung des Stromes zu erwähnen. Der Klirrfaktor K_i erhöht sich von 0,07 auf 0,18. Trotzdem bleibt die Oberwellenleistung bezogen auf die gesamte Leistung an der Meßstelle A mit $5 \cdot 10^{-5}$ sehr klein und verursacht keine messbaren Zusatzfehler.

7.4 Doppelweg-90°-Phasenanschnittsteuerung mit ohmscher Belastung

Die Stromverzerrungen sind etwas kleiner als bei den Fernsehempfängern (Fig. 11). Obwohl die Belastung rein ohmisch ist, eilt die Grundwelle des Stromes um ca. 32° hinter der Spannung nach, was durch die unsymmetrische Phasenanschnittsteuerung des Stromes verursacht wird. Die Oberwellenleistung P_h bezogen auf die gesamte Leistung P an der Meßstelle A beträgt trotz der grossen Verzerrung im Strom nur ca. 0,11% und verursacht ebenfalls keine messbaren Zusatzfehler.

Würde hingegen die Wirkenergie vom Induktionszähler am Messpunkt B hinter dem TRIAC gemessen, so würde die Messgenauigkeit durch die Oberwellenleistung in erheblichem Masse beeinflusst, wie die nachfolgenden Überlegungen zeigen: Das Verhältnis P_h/P an der Meßstelle B hinter dem TRIAC beträgt ca. 28 % und der daraus resultierende Messfehler ca. -17 %. Es ist zu beachten, dass der Induktionszähler an der Meßstelle B die gesamte Energie mit negativen Fehlern misst, weil Ober- und Grundwellenleistung dieselbe Richtung haben.

8. Kombination verschiedener nichtlinearer Belastungen als Modellfall

Bei gleichzeitiger Belastung durch verschiedene nichtlineare Verbraucher beim Abonnenten tritt bei den Oberwellenströmen derselben Ordnungszahl eine teilweise Kompensation auf, verursacht durch die unterschiedliche Phasenlage der Oberwellenströme. Es sei deshalb nachfolgend ein Modellfall behandelt, der sich aus den Belastungen der vorhergehenden Beispiele zusammensetzt.

In Tabelle I ist ersichtlich, dass alle nichtlinearen Belastungen den Strom mehr oder weniger stark verzerrn. In Figur 12 sind die Vektoren der Grund- und Oberwellenströme der einzelnen Verbraucher sowie deren geometrische Summe eingezeichnet. Der Einfachheit halber wurden nur die Ordnungszahlen 1 bis 7 berücksichtigt, da sie den Hauptanteil am Stromspektrum ausmachen.

Die Grundwellenströme liegen mit Ausnahme von Fall 7.1 leicht induktiv verschoben. Die Verschiebung des resultierenden Grundwellenstromes beträgt ca. 20° ind. und entspricht einem Leistungsfaktor von 0,94. Der resultierende Grundwellenstrom ist um ca. 4 % kleiner als die algebraische Summe der einzelnen Grundwellenströme. Der Gleichphasigkeitsfaktor k_p beträgt 0,96.

Bei den Oberwellenströmen ist der Kompensationseffekt durch die stark unterschiedlichen Phasenlagen wesentlich grösser. Der Gleichphasigkeitsfaktor k_p beträgt für die 3. Oberwelle 0,40, für die 5. Oberwelle 0,58 und für die 7. Oberwelle 0,46. Wird der Effektivwert der resultierenden Oberwellenströme aus den Summenströmen der einzelnen Belastungen berechnet, so erhält man einen Kompensationseffekt von

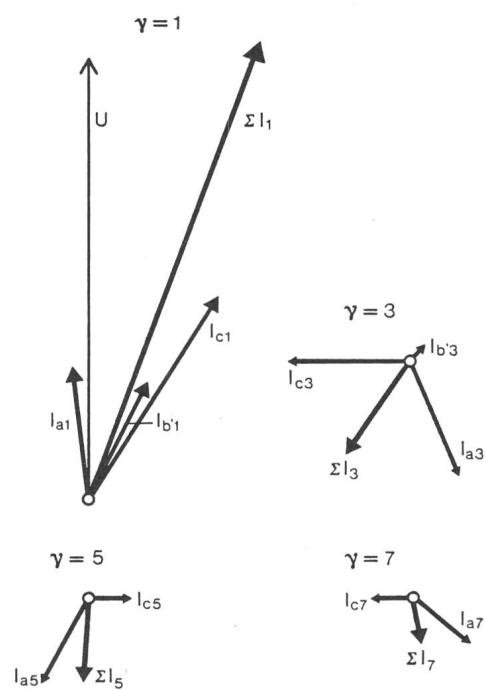


Fig. 12 Vektordiagramm der harmonischen Ströme
Belastung (Index)
a Television
b Fluoreszenzbeleuchtung
c 90°-Phasen-Anschnittsteuerung

ca. 46 %, was einem k_p von ca. 0,54 entspricht. Schliesslich reduziert sich der Anteil der resultierenden Oberwellenleistung bezogen auf die gesamte Leistung gegenüber der algebraischen Summe der Anteile der einzelnen Oberwellenleistungen um ca. 72 %. Der Gleichphasigkeitsfaktor k_p beträgt ca. 0,28.

Aus Tabelle I ist ersichtlich, dass bei alleiniger eingeschalteter Belastung nach 7.4 (Phasenanschnittsteuerung) an der Meßstelle A eine Oberwellenleistung P_h/P von $1,2 \cdot 10^{-3}$ auftritt. Werden die Belastung nach 7.1 (Fernsehempfänger) und

Zusammenstellung der Belastungsfälle

Tabelle I

Fall	7.1 Television	7.3 Fluoreszenzbeleuchtung mit Kompensation	7.4 90°-Phasenanschnittsteuerung
U_1	220 V	220 V	220 V
I_1	0,80 A	0,78 A	1,35 A
φ_1	-60° cap.	25° ind.	32° ind.
I	1,27 A	0,79 A	1,60 A
I_h	0,99 A	0,14 A	0,84 A
K_i	0,78	0,18	0,53
P	176 W	156 W	250 W
P_1	176,4 W	156 W	250,3 W
P_h	-0,4 W	-8 $\cdot 10^{-3}$ W	-0,3 W
P_h/P	-2,2 $\cdot 10^{-3}$	-5 $\cdot 10^{-5}$	-1,2 $\cdot 10^{-3}$
	Kombinierte Belastung A	Worst Case B	Kompensationseffekt A/B %
I	2,94 A	3,51 A	84 %
I_h	0,88 A	1,92 A	46 %
K_i	0,30	0,54	56 %
P	582 W	772 W	75 %
P_h	0,31 W	1,47 W	21 %
P_h/P	0,53 $\cdot 10^{-3}$	1,9 $\cdot 10^{-3}$	28 %

7.3 (Fluoreszenzbeleuchtung mit Phasenkompensation) mit eingeschaltet, so wird dadurch der Anteil der Oberwellenleistung an der gesamten Leistung um ca. 56 % kleiner.

Eine Ausnahme bilden die Fernsehempfänger nach dem Prinzip der «switched mode control» Schaltung [5]. Nach Figur 8 liegt deren Stromgrundwelle praktisch in Phase mit der Spannung, und die Phasenlagen der einzelnen Oberwellen hängen nicht wie bei der Phasenanschnittsteuerung von der Grösse des Regelgrades der Leistung ab. Damit wird k_p bei mehreren angeschlossenen Geräten grösser und der Kompensationseffekt der Oberwellen derselben Ordnungszahl weniger ausgeprägt.

Da die jährliche Zahl der neuinstallierten Fernsehapparate auch heute noch im Zunehmen begriffen ist, liegt das Problem der Verseuchung der Versorgungsnetze durch Stromoberwellen hauptsächlich bei diesen Apparaten. Bestehende Vorschriften [6] untersagen übrigens die Verwendung von phasenanschnittgesteuerten Regelgeräten für die Erzeugung von Wärme. Damit ist wohl ein potentieller Erzeuger von Stromoberwellen a priori ausgeschaltet.

9. Analyse eines Spezialfalles

Die als Beispiele behandelten Belastungsfälle betreffen Verbraucher mit nichtlinearer Kennlinie, bei denen die positive und negative Stromhalbwelle gleicherweise verzerrt sind. Deshalb enthält das Stromspektrum nur Oberwellen mit ungeraden Ordnungszahlen und vor allem keine Gleichstromkomponente.

Daneben werden aber auch Geräte mit Einweggleichrichtung eingesetzt, die durch eine ausgeprägte Gleichstromkomponente gekennzeichnet sind. Darunter fallen vor allem Schwarzweiss-Fernsehempfänger. Da die Induktionszähler die Gleichstromleistungen bekanntlich nicht messen, werden in diesen Fällen grössere Messfehler erwartet. Es sei deshalb abschliessend noch ein Fall behandelt, der wohl theoretischer Natur ist; die Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses der Gleichstromkomponente auf die Messeigenschaften der Induktionszähler können aber ohne weiteres auf die Praxis angewendet werden.

Ein Netz mit vernachlässigbarer Leitungsimpedanz Z_L speist über einen Einweggleichrichter eine ohmsche Belastung, die zur Heizung eines Wohnraumes verwendet wird (Fig. 13). Aus der Analyse des Stromes ergibt sich neben den Grund- und Oberwellen auch eine Gleichstromkomponente von ca. 32 % des Spitzenwertes I des Stromes. Dieser Gleichstrom I_0 erzeugt am Widerstand R eine Heizleistung von $P_0 = I_0^2 \cdot R$. Dieser Anteil macht ca. 40 % der vom gesamten Strom erzeugten Wärme aus. Neben der Gleichstromkomponente tritt eine Grundwelle von 50 % des Spitzenwertes I des Stromes auf. Die vom Netz bezogene Leistung berechnet sich zu $P_1 = U \cdot I_1$, da die Netzspannung wegen des vernachlässigbaren Innenwiderstandes sinusförmig bleibt. Über diese Stromgrundwelle wird die gesamte vom Netz bezogene elektrische Wirkenergie richtig gemessen. Trotz der Gleichstromkomponente tritt wegen des fehlenden Innenwiderstandes der Zuleitung keine Gleichstromleistung an der Meßstelle auf, da die Netzspannung keine Gleichspannungskomponente aufweist.

10. Schlussbemerkungen

Die relativ grossen Verzerrungen im Strom beim Anschluss von Geräten mit nichtlinearer Kennlinie an das öffentliche Versorgungsnetz lassen vermuten, dass mit dem Einsatz von

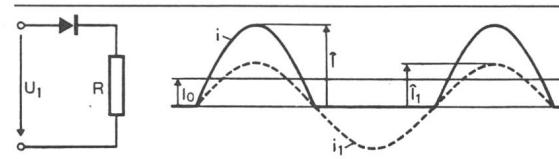


Fig. 13 Einweggleichrichtung mit ohmscher Belastung
Spannungsquelle ohne Innenwiderstand R_L

Elektrizitätszählern der heute üblichen Bauart erhebliche Messfehler auftreten können. Ob sich eine eventuelle Falschmessung zugunsten des Lieferwerkes oder der Abonnenten auswirkt, kann auch nicht ohne weiteres entschieden werden.

Die vorliegenden Erläuterungen zeigen, dass diese Bedenken nicht begründet sind. Obwohl die Verzerrungen im Strom u. U. sehr gross sein können, bleibt die entsprechende Verzerrung in der Netzspannung in allen Fällen verschwindend klein. Da die Oberwellenleistung an der Meßstelle das Produkt aus den Oberwellen in Spannung und Strom derselben Ordnungszahl ist, bleibt der Anteil Oberwellenleistung bezogen auf die gesamte Leistung an der Meßstelle klein. Damit entstehen auch bei der Verwendung von Induktionszählern in allen praktischen Fällen nur verschwindend kleine Zusatzfehler, die gegenüber anderen Fehlerursachen wie z.B. Einfluss der Umgebungstemperatur am Messort, Grösse der Belastung usw. ohne Bedeutung sind.

Hingegen machen sich die Auswirkungen von Verzerrungen im Strom hauptsächlich bei denjenigen Geräten und Anlagen bemerkbar, die den Strom allein – und nicht die Wirkenergie – als Funktionsmerkmal benötigen. Darunter fallen beispielsweise Fehlerstromschutzschalter.

Literatur

- [1] F. Tschappu: Moderne Methoden zur verlustlosen Leistungsregelung unter Berücksichtigung ihres Einflusses auf die Messgenauigkeit der Elektrizitätszähler. Landis und Gyr Mitt. 20(1973)3, S. 20...26.
- [2] F. Tschappu: Einsatzmöglichkeiten und Grenzen der modernen Leistungsregelung mittels Thyristoren im Hinblick auf die Beeinflussung der Energiemessung. Landis und Gyr Mitt. 26(1979)2, S. 15...21.
- [3] Überblick über die Oberschwingungsverhältnisse in öffentlichen Stromversorgungsnetzen. Elektrizitätswirtsch. 78(1979)25, S. 1008...1017.
- [4] F. Tschappu: Messmethoden zur Bestimmung des Einflusses von Netzoberwellen auf die Messgenauigkeit der Elektrizitätszähler. Teil I. Arch. Techn. Messen (1968)385, S. 33...36, Teil II Arch. Techn. Messen (1968)386, S. 53...58.
- [5] G. Goldberg: Netzoberschwingungen durch Fernsehempfänger. Bull. SEV/VSE 71(1980)3, S. 137...142.
- [6] H. Mühlthaler und F. Pfister: Übersicht über die Empfehlungen, Richtlinien und Regeln für den Anschluss von Geräten mit Phasenanschnitt- und Schwingungspaketsteuerungen. Bull. SEV/VSE 68(1977)11, S. 531...535.

Adresse des Autors

Dr. sc. techn. Fred Tschappu, LGZ Landis & Gyr AG, 6301 Zug.

Anhang: Gleichungen

Index h Harmonische allgemein
 v v. Harmonische (Oberwelle)
 1 Grundwelle
 0 Gleichstromkomponente
 n Höchste vorkommende Harmonische
 \wedge Spitzenwert
 ohne spez. Bezeichnung → Effektivwert

Allgemeine Gleichungen

- (1) $U = \sqrt{U_1^2 + \dots + U_n^2} = \sqrt{U_1^2 + U_h^2}$
- (2) $U_h = \sqrt{U_2^2 + \dots + U_n^2}$
- (3) $I = \sqrt{I_1^2 + \dots + I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_h^2}$
- (4) $I_h = \sqrt{I_2^2 + \dots + I_n^2}$
- (5) $K_h = I_h/I$ Klirrfaktor des Stromes

- (6) $P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = I_1^2 \cdot R$ Grundwellenleistung
- (7) $P_h = \sum_2^n U_v \cdot I_v \cdot \cos \varphi_v = I_h^2 \cdot R_L$ Oberwellenleistung
- (8) $P = P_1 + P_h$ gesamte Leistung
- (9) $P_h/P = (R_L/R) \cdot (I_h/I)^2 = (R_L/R) \cdot K_1^2$ (für $K_1 \ll 1$)
- (9') $P_h/P_1 = (R_L/R) \cdot (I_h/I_1)^2$ (exakte Formel)
- (10) $U_h = I_h \cdot R_L$ Oberwellenspannung an der Sammelschiene
- (11) $F = [(P_0/P) - \sum (F_v \cdot P_h/P)] \cdot 100\%$
- (12) $F = -[\sum (F_v \cdot P_h/P)] \cdot 100\%$

Generator + Zuleitung

- (13) $P_{L1} = R_L \cdot I_1^2$ Grundwellenleistung an R_L
- (14) $P_{A1} = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ Grundwellenleistung an der Meßstelle A

- (15) $P_G = P_{L1} + P_{A1}$ vom Generator abgegebene Grundwellenleistung
- (16) $P_{Lh} = R_L \cdot I_h^2 = -P_{Ah}$ Oberwellenleistung an der Meßstelle A
- (17) $P_L = P_{L1} + P_{Lh} = R_L \cdot I^2$ gesamte Leistung an R_L

Sammelschiene

- (18) $P_A = P_{A1} - P_{Ah}$ gesamte Leistung an der Meßstelle A

Verbraucher (Punkt B)

- (19) $P_{B1} = R \cdot I_1^2$ Grundwellenleistung
- (20) $P_{Bh} = R \cdot I_h^2$ Oberwellenleistung
- (21) $P_B = P_{B1} + P_{Bh} = R \cdot I^2$ gesamte Leistung
- (22) $P_{Bh}/P_B = (I_h/I)^2 = K_1^2$ relative Oberwellenleistung
- (23) $P_{Bh}/P_{Ah} = R/R_L$

Literatur – Bibliographie

DK: 621.577

SEV-Nr. A 689/V

Die elektrische Wärmepumpe. Wärmepumpentechnologie Band V. Vorträge der deutsch/amerikanischen Konferenz über Technik und Anwendung vom 18. bis 20. Juni 1980 in Düsseldorf. Essen, Vulkan-Verlag, 1980; 4°, 152 S., 175 Fig. Preis: geb. DM 80.-

Der fünfte Band in der Reihe «Wärmepumpentechnologie» ist die Zusammenfassung aller Vorträge, die anlässlich der deutsch/amerikanischen Konferenz über Technik und Anwendung der Wärmepumpe vom 18. bis 20. Juli 1980 in Düsseldorf gehalten wurden.

Unter dem Kapitel «Raumheizung» wird ein Überblick über die Anwendung der Wärmepumpe als Gebäudeheizung in den USA und Deutschland gegeben. Weiter wird von einigen interessanten Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Kompressoren berichtet. Ein weiterer Abschnitt ist der industriellen Wärmepumpenanwendung gewidmet, wobei besonders auf Probleme der Trocknungstechnik eingegangen wird. Im letzten Kapitel werden einige Zukunftsszenarien der Wärmepumpentechnologie behandelt, so z.B. das Energiedach als Wärmequelle für Wärmepumpen und Wärmepumpen mit Mehrstoffkältemitteln.

Das Buch ist kein Lehrbuch, sondern ist in erster Linie als Information für Fachleute gedacht. Zu beachten ist weiterhin, dass ein grosser Teil der Beiträge in englisch abgefasst ist. *F. Michels*

DK: 621.317

SEV-Nr. A 543

Lexikon der industriellen Messtechnik. Von *Paul Profos*. Essen, Vulkan-Verlag, 1980; kl. 8°, 292 S. Preis: geb. DM 44.-

Die vielen neuen Anwendungsmöglichkeiten der Elektronik brachten der Messtechnik in den letzten Jahrzehnten eine enorme Entwicklung, die kaum mehr überblickbar ist. Um Laien und Fachleute schnell über wichtige messtechnische Begriffe zu orientieren, hat der Verfasser im Handbuch der industriellen Messtechnik den Versuch unternommen, die erwünschte Hilfe zu geben.

Die Chemie-, Elektro- und Maschinenindustrie-Betriebe verwenden zwar alle die gleichen Messprinzipien und Instrumente, aber ihre Fachsprachen sind z.T. recht unterschiedlich. Im vorliegenden Lexikon ist es recht gut gelungen, alle Bereiche einigermaßen auf den gleichen Nenner zu bringen. Als Elektroingenieur und vor allem wegen der immer mehr dominierenden Digitalelektronik wünschte sich der Rezensent präzise Definitionen und eine konsequente Anwendung der neuesten, grundlegenden DIN-Norm 1319.

Es ist anzuzweifeln, ob Strommesser wirklich die ältere Bezeichnung von Ampermeter ist. Man misst doch die physikalische Grösse und nicht die Einheit. Ein Manometer wird ja auch nicht als Pascalmeter bezeichnet. Ein häufig anzutreffender Fehler hat sich auch eingeschlichen: Ein Wattstundenzähler ist ein Zähler für elektrische Energie und nicht ein Elektrizitätszähler für Gleichstrom. Die üb-

lichen «kWh-Zähler» besitzen eine Ferraris-Scheibe und funktionieren dank Wirbelströmen, die aber nur bei zeitlich veränderlichen Strömen entstehen. Für ein vertieftes Studium wäre es angenehm, wenn sich die speziellen Literaturhinweise direkt beim Schlagwort befinden würden.

Trotz diesen kleinen Mängeln kann das Lexikon vielen Praktikern und auch Studierenden der Richtungen Maschinenbau, Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen und verwandter Gebiete viele zweckmässige Informationen liefern.

Hs.-Hch. Giger

DK: 621.313.025.3:621.313.32/.33.035.61:621.314.57

SEV-Nr. A 861

Stromrichtergespeiste Drehfeldmaschinen. Von *Hans Kleinrath*. Wien/ New York, Springer-Verlag, 1980; 8°, XVIII/278 S., 140 Fig. Preis: geb. DM 138.-

Das Erscheinen dieses Buches beweist die Bedeutung, welche die drehzahlvariablen Drehstromantriebe, bedingt durch die Entwicklung auf dem Gebiet der Leistungselektronik, in den letzten fünfzehn Jahren erlangt haben.

Der Buchtitel lässt erkennen, dass es primär um die Behandlung des Verhaltens des Motors bei Beeinflussung durch Stromrichter-speisung geht. Entsprechend dem unterschiedlichen Einfluss der verschiedenen Umrichterschaltungen werden folgende Probleme behandelt: Berechnung von Strom- bzw. Spannungsform, Auswirkungen der Oberschwingungen auf Verluste, Drehmoment und magnetisches Geräusch sowie transientes Verhalten der Maschine. Die Ergebnisse der Berechnung liefern Daten nicht nur für die Motorbeanspruchung, sondern auch für die Belastung der Stromrichter-ventile und für die Auslegung der elektronischen Regelung. Alle Berechnungsabläufe sind für eine digitale Rechnung konzipiert.

Das erste Kapitel gibt einen Überblick über die Wirkungsweise der verschiedenen Umrichterschaltungen. Im zweiten Kapitel wird die stromrichtergespeiste Asynchronmaschine vorgestellt, d.h. der Asynchronmotor mit Spannungzwischenkreis-Umrichter, mit Stromzwischenkreis-Umrichter und die untersynthronre Stromrichterkaskade. Es wird zunächst das Verhalten des Motors an der Grundschwingung betrachtet, anschliessend der Einfluss der Oberschwingungen. Zu jeder Variante wird ein Zahlenbeispiel angegeben. Dann wird die Synchronmaschine mit Umrichterspeisung («Stromrichtermotor») behandelt. Einleitend wird die maschinengeführte Kommutierung erläutert, anschliessend werden die Schaltungsvarianten vorgestellt, d.h. Synchronmotor mit Zwischenkreisumrichter und Spannungssteuerung, Polradlagesteuerung bzw. Fremdsteuerung, sowie mit Direktumrichter. Für den Antrieb mit Zwischenkreisumrichter wird auch auf das wichtige Problem des Anlaufs eingegangen. Das letzte Kapitel (Transientes Verhalten von Drehfeldmaschinen) enthält eine Zusammenfassung der Rechnung mit