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: 66 (1975)

Heft: 24

Artikel: Oberschwingungsanalyse in der elektrischen Energietechnik

Autor: Weiler, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915333

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: 12.12.2025

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

Oberschwingungsanalyse in der elektrischen Energietechnik [1])

Von J. Weiler

621.317.353

Die stetige Zunahme nichtlinearer Verbraucher in den elektrischen Energienetzen bewirkt eine Verzerrung sowohl des Netzstromes als auch der Netzspannung, welche andere Verbraucher oder benachbarte Anlagen der Informationsübermittlung stören kann. Im vorliegenden Artikel soll dem Energietechniker, der sich mit der Messung dieser Verzerrungen konfrontiert sieht, ein Überblick über die möglichen Messverfahren und die dabei zu beachtenden Fehlerquellen gegeben werden.

L'accroissement continuel du nombre de consommateurs d'énergie électrique à caractéristique nonlinéaire provoque une déformation de la forme d'onde et du courant et de la tension du réseau, déformation qui peut influencer d'autres systèmes. Afin de pouvoir pallier à ces effets, une surveillance étroite des harmoniques du réseau est nécessaire. L'article présent donne un aperçu des méthodes de mesure possibles ainsi que des sources d'erreurs.

1. Einleitung und theoretische Grundlagen

Signalanalyse, Frequenzanalyse, Oberwellen..., sind Begriffe, welche bis vor nicht allzulanger Zeit eher zum Wortschatz der Nachrichtentechniker als der Energietechniker gehörten, konnte doch in Energieübertragungssystemen immer von einer weitgehend sinusförmigen Kurvenform von Strom und Spannung ausgegangen werden. Die Zunahme von nichtlinearen Verbrauchern, insbesondere der Einsatz von Verfahren der Energieelektronik sowohl in der Industrie als auch im Haushalt hat nun dazu geführt, dass die Kurvenform des Stromes sich immer weiter von der idealen Sinusform entfernt. Damit wird über die Netzimpedanz auch die Kurvenform der Spannung verzerrt, was wiederum Rückwirkungen auf andere Verbraucher haben kann.

Zur Untersuchung dieser störenden Einflüsse ist es günstig, nicht mehr den zeitlichen Verlauf der verzerrten Ströme und Spannungen, sondern ihre Zerlegung in Frequenzkomponenten mit zeitlich nicht oder nur sehr langsam variierender Amplitude heranzuziehen. Solange die beeinflussten Systeme als linear oder linearisiert angesehen werden können, kann dann der Einfluss der verzerrten Kurvenformen durch Superposition der Einflüsse der einzelnen sinusförmigen Komponenten ermittelt werden.

[1]) Nach einem Vortrag, gehalten am 12. November 1975, im Rahmen der Seminarien des Institutes für Automatik und Industrielle Elektronik der ETHZ.

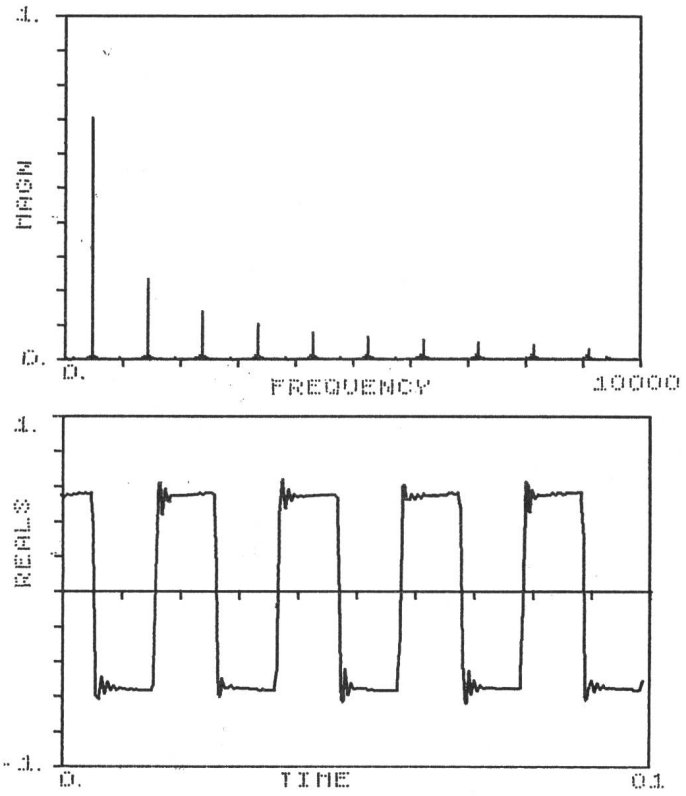


Fig. 1 Korrespondenz Frequenzbereich–Zeitbereich; Amplitudenspektrum (Magn) und daraus rekonstruierter zeitlicher Vorgang (Reals)

Die Zerlegung in die einzelnen Komponenten kann theoretisch einfach mit Hilfe der klassischen Fourierzerlegung einer periodischen Funktion $f(t)$ vorgenommen werden:

$$f(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega_1 t + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin n\omega_1 t \tag{1a}$$

$$= F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos (n\omega_1 t + \varphi_n) \tag{1b}$$

Darin ist ω_1 die Grundkreisfrequenz $2\pi/T_1 = 2\pi f_1$ der periodischen Funktion $f(t)$ mit der Periode T_1 bzw. der Grundfrequenz f_1. Die Komponenten A_n und B_n bzw. C_n und φ_n bestimmen sich aus der Transformationsgleichung

$$A_n = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} f(t) \cos n\omega_1 t \, dt \tag{2a}$$

$$B_n = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} f(t) \sin n\omega_1 t \, dt \tag{2b}$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}\,, \quad \varphi_n = \operatorname{arc\,tg} \frac{B_n}{A_n} \tag{2c}$$

F_0 ist der lineare Mittelwert, d. h. das Gleichstromglied,

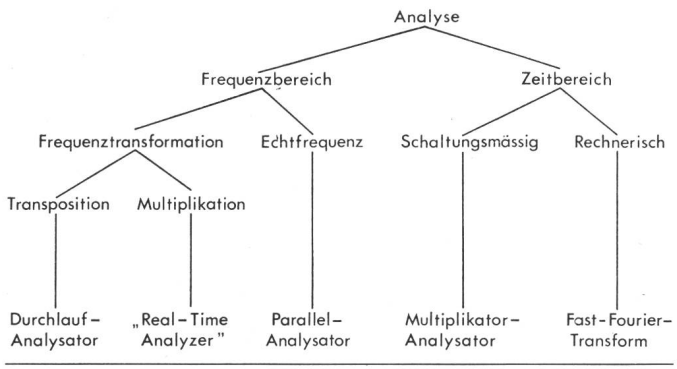
$$F_0 = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} f(t) \, dt$$

In Fig. 1 ist eine solche Zerlegung nach den Gl. (2) bzw. eine Synthese nach den Gl. (1) am Beispiel einer Rechteckfunktion der Grundfrequenz $f_1 = 500$ Hz dargestellt: oben die Zerlegung in die Komponenten C_n, unten die Addition gemäss Gl. (1). Trotzdem nur 10 Komponenten C_n berücksichtigt wurden, ergibt sich schon eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Originalzeitfunktion und der aus der Fourierzerlegung rekonstruierten.

In den meisten Fällen liegt nun aber $f(t)$ nicht in analytischer Form, sondern als analoges Meßsignal, z. B. als Netzstrom oder daraus abgeleitete Shunt-Spannung, vor, wobei von diesem Signal die Fourierzerlegung gewünscht wird. Es müssen also Messgeräte verwendet werden, welche die Transformation Zeitfunktion → Fourierkomponenten («Spektrum») vornehmen. Hierzu bieten sich zwei grundsätzliche Methoden an:

– im Frequenzbereich: Ausblenden aller Frequenzen bis auf eine Frequenz f_n, Messung der Amplitude oder des Effek-

Tabelle I



tivwertes des dann noch verbleibenden sinusförmigen Signals (Filterung);

– im Zeitbereich: direkte Anwendung der Gl. (2)

Aufwandmässig ist bei Anwendung klassischer Techniken die Filterung in allen Fällen günstiger, so dass sie am weitesten verbreitet ist. Einen Nachteil haben allerdings alle Filterverfahren: mit ihnen lässt sich nur C_n, d.h. der Betrag der Amplitude der Oberwelle, nicht aber die Phasenlage φ_n bestimmen. Die direkte Anwendung der Gl. (2) wird im allgemeinen erst durch den Einsatz modernster elektronischer Hilfsmittel realisierbar.

Eine systematische Morphologie der möglichen Verfahren führt zu der in Tabelle I gegebenen Aufstellung über die realisierbaren Analyseprinzipien. Die verschiedenen Verfahren werden nun im folgenden kurz beschrieben und vor allem auf ihre Einsatzmöglichkeiten in der Energietechnik untersucht.

2. Analyse im Frequenzbereich (Filterverfahren)

Das Grundprinzip aller Filterverfahren ist in Fig. 2 dargestellt: Vom zu messenden Spektrum werden alle Frequenzen bis auf ein schmales Band Δf um die zu analysierende Frequenz f_n mit einem Filter ausgeblendet. Die dann noch verbleibende Restspannung wird gemessen und als Effektivwert von C_n der Frequenz f_n zugeordnet.

Dieses Verfahren lässt sich auch anders interpretieren: Grundsätzlich muss die im Frequenzband Δf enthaltene Leistung, bezogen auf 1 Ω, gemessen werden. Diese kann als Leistung einer sinusförmigen Grösse der Frequenz f_n betrachtet werden, und entsprechend wird der Effektivwert der Komponente C_n durch Halbierung und Radizierung erhalten. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die gemessene bezogene Leistung durch die Filterbreite Δf zu dividieren und als Leistungs*dichte* (z. B. V^2/Hz) der Frequenz f_n zuzuordnen; dies ist allerdings nur bei kontinuierlichen Spektren, und nicht bei den diskreten Linienspektren der Energietechnik sinnvoll.

Mit diesen Überlegungen lassen sich nun die Anforderungen an das Filter formulieren:

– Die Filterbreite Δf soll möglichst klein sein, damit tatsächlich nur die Leistung einer einzigen Frequenzlinie erfasst wird

– Die Filterflanken müssen aus dem gleichen Grund möglichst steil sein, damit Beiträge benachbarter Frequenzen möglichst stark gedämpft werden

– Im Durchlassbereich soll die Filtercharakteristik möglichst flach sein, damit die ganze Filterbreite Δf gleich gewichtet wird

Diese Bedingungen lassen sich in ihrer Gesamtheit praktisch nur mit Quarzfiltern und damit bei relativ hohen Frequenzen (ab ca. 50 kHz) genügend gut erfüllen, mit klassischen Filtern nur angenähert und lediglich für eine gegebene Frequenz f_n.

Damit sind auch die in Tabelle I angegebenen Verfahren verständlich: entweder verwendet man ein fix abgestimmtes Filter und bringt durch Kunstgriffe das zu analysierende Frequenzband ($1 \cdot f_1 ... n f_1$) in den Durchlassbereich des Filters oder man verwendet verschiedene Filter, welche auf entsprechend unterschiedliche Mittelfrequenzen abgestimmt sind. Diese verschiedenen Prinzipien sollen nun anhand ihrer Blockschemata und der zugehörigen Darstellung im Frequenzbereich erläutert werden.

2.1 Parallelanalysator

Das Blockschaltbild des Parallelanalysators ist in Fig. 3a angegeben: Das zu analysierende Signal $f(t)$ wird simultan einer ganzen Anzahl fest abgestimmter Filter (Mittelfrequenzen $f_1, f_2 ... f_n$) zugeführt und am Ausgang jedes dieser Filter der Effektivwert, der dann die Frequenzlinie $C(f_n)$ gibt, gemessen. In Fig. 3b ist dieses Verfahren im Frequenzbereich dargestellt: Das ganze zu analysierende Spektrum muss im Idealfall lückenlos, mit möglichst steilflankigen Filtern (hier ein Filter pro zu erwartende Oberwelle) abgedeckt werden.

Damit ist auch schon das Hauptproblem dieses Analysatortyps für Anwendungen in der Energietechnik aufgezeigt: Oberwellen können hier im Abstand der Grundfrequenz f_1, also z. B. alle 50 Hz oder alle $16^2/_3$ Hz auftreten. Möchte man Spektrallinien bis zu einer Amplitude von $^1/_{1000}$ der Grundwelle erfassen, so müssen für ein rechteckförmiges Signal Komponenten bis zur tausendsten Oberwelle (also bis n = 1000) entsprechend 1000 Filtern einbezogen werden. Auch wenn man für praktische Fälle die Grenzfrequenz der zu erfassenden Oberwellen auf 1000...2000 Hz (f_1 = 50 Hz) reduziert und berücksichtigt, dass im allgemeinen nur ungeradzahlige Oberwellen auftreten sollen, so sind immerhin noch 20 Filter im Abstand von 100 Hz notwendig. Dies erklärt, weshalb der Parallelanalysator trotz seiner unbestreitbaren Vorteile (insbesondere simultanes Vorliegen aller Oberwellen) in der Energietechnik keine Verwendung findet. Sein Hauptanwendungsbereich liegt in der Akustik, da dort die Filterabstände nicht konstant sind, sondern proportional zur Mittelfrequenz (Oktave, Terz usw.) variieren.

2.2 Durchlaufanalysator

Dem Durchlaufanalysator liegt das Prinzip zugrunde, dass nur ein fest abgestimmtes Filter der Mittelfrequenz verwendet wird, in dessen Durchlassbereich das zu analysierende Spek-

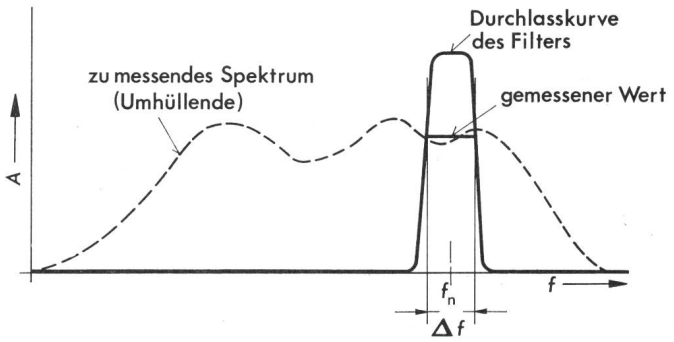


Fig. 2 Prinzip des Filterverfahrens zur Frequenzanalyse
f_n zu analysierende Frequenz
Δf Filterbandbreite
A Amplitude

trum sukzessive transponiert wird, wie im Blockschaltbild Fig. 4a angegeben.

Die Transposition geschieht in einem Modulator, in welchem das zu analysierende Signal $f(t)$ mit einem Hilfssignal (Trägersignal) der Frequenz f_H multipliziert wird. Gemäss den Gesetzen der Modulationstheorie entsteht dann, z. B. bei einem sinusförmigen Hilfssignal, ein transponiertes Spektrum, das als Frequenzen die Summe $(f_H + f_n)$ und die Differenz $(f_H - f_n)$ von Trägerfrequenz und Originalsignal $f(t)$ enthält. Durch Variation von f_H kann damit, wie in Fig. 4b für zwei Fälle angegeben ist, jede Frequenzlinie des Grundsignals sukzessive auf eine transponierte Frequenz, entsprechend der Mittelfrequenz f_0 des Filters, gebracht und somit gemessen werden.

Eines der Hauptprobleme beim Durchlaufanalysator ist die Messzeit T_M, welche benötigt wird, um ein gegebenes Spektrum der Breite D (Differenz zwischen höchster und niedrigster Analysefrequenz) mit einer gegebenen Filterbreite Δf zu messen. Hierzu muss zuerst das transiente Verhalten eines Filters untersucht werden. Wie man aus Fig. 5 ersieht, wächst mit abnehmender Durchlassbreite Δf die Zeit t_E, die vergeht, bis das Filter eine angelegte Spannung der Durchlassfrequenz in voller Amplitude durchlässt, ungefähr umgekehrt proportional zu Δf: $t_E \approx 1/\Delta f$. Andrerseits muss die Analysebreite in $D/\Delta f$-Segmente unterteilt werden, so dass für die Messzeit T_M die Faustformel folgt:

$$T_M \geqq D/(\Delta f)^2$$

Ein weiteres Problem resultiert aus der bei den meisten für Netzfrequenz noch brauchbaren Analysatoren verwendeten relativ hohen Filterfrequenz f_0, die immer oberhalb 100 kHz (gewöhnlich 1 MHz) liegt. Schon kleinste prozentuale Schwankungen (insbesondere durch thermische Driften) können schnell eine scheinbare Verschiebung um einige 50 Hz bewirken und damit eine dauernde Nacheichung des Gerätes notwendig machen.

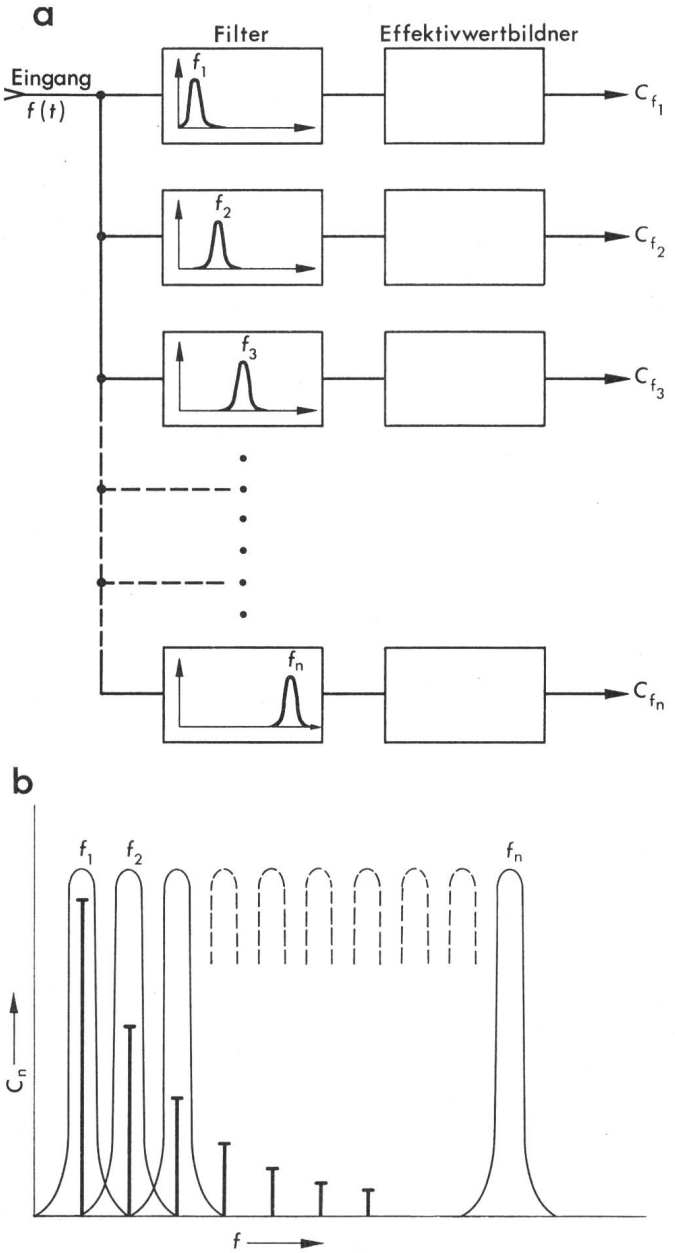


Fig. 3 Parallelanalysator: a) Blockschaltbild, b) Darstellung des Analyseprinzips mit n parallelen Filtern im Frequenzbereich
$C_{f1}...C_{fn}$ Amplitude der Oberwellen der Frequenz $f_1...f_n$

2.3 «Real-Time Analyzer»

Eng verwandt mit dem Durchlaufanalysator ist der sogenannte «Real-Time Analyzer», der die Analyse niederfrequenter Signale in wesentlich kürzerer Zeit durchführen kann. Sein Prinzip ist in Fig. 6a angedeutet: Das zu analysierende Signal $f(t)$ wird im Ablauf um den Faktor k beschleunigt. Dies geschieht bei ausgeführten Geräten durch Speicherung und beschleunigte Wiedergabe eines Abschnittes (einige Perioden) des Signals. Dadurch wird die Periode T_1 auf T_1/k erniedrigt, die Frequenz f_1 auf $k \cdot f_1$ vergrössert (Übergang von a nach b in Fig. 6b). An diese Frequenzmultiplikation schliesst sich nun z. B. eine Durchlaufanalyse gemäss 2.2 an, die bei gleicher Auflösung $D/\Delta f$ eine um k kleinere Messzeit benötigt.

Dieses vielversprechende Prinzip, welches die Einfachheit des Durchlaufanalysators mit starker Reduktion der Messzeit verbindet, wurde erst durch den Einsatz der modernen digitalen Speichertechnik sinnvoll ermöglicht: Das zu analysierende Signal wird über eine bestimmte Zeit abgetastet und digital gespeichert. Diese gespeicherten Werte werden dann wesentlich schneller wieder in eine analoge Wertfolge zurückverwandelt. Die Analyse kann mit einem fest abgestimmten Filter entweder durch Variation der Rückwandlungsgeschwindigkeit (Variation des Faktors k) oder, bei konstanter Rückwandlungsgeschwindigkeit, mit einem konventionellen Durchlaufanalysator (Fig. 6b, Frequenzachse c) vorgenommen werden. Die Möglichkeiten der heutigen Digitaltechnik und Analog/Digitalwandlung sind dabei derart, dass die Messzeit praktisch nur durch das Einlesen des Originalsignals in den Speicher gegeben ist.

3. Analyse im Zeitbereich

Wie schon in der Einleitung ausgeführt, wird bei der Analyse im Zeitbereich direkt die mathematische Fourierzerlegung gemäss den Gl. (2a) und (2b) durchgeführt. Dies kann entweder schaltungstechnisch (Multiplikator-Analysator) oder rechnerisch (Fourier-Transform) geschehen.

3.1 Multiplikator-Analysator

Das Prinzip des Multiplikator-Analysators ist in Fig. 7 dargestellt. Die Hauptprobleme dieses Analysators bestehen einmal in der simultanen Erzeugung der zwei um 90° phasenverschobenen, im Idealfall starr mit der Grundfrequenz f_1 verknüpften, sinusförmigen Referenzspannungen $\sin n\omega_1 t$ und

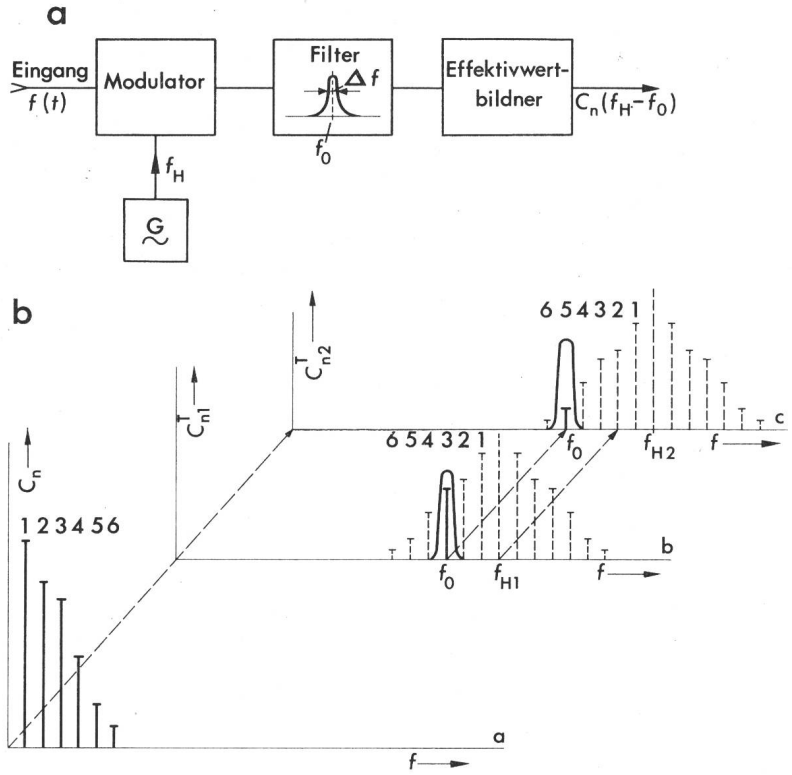


Fig. 4
Durchlaufanalysator: a) Blockschaltbild, b) Darstellung im Frequenzbereich, mit den Frequenzachsen des Originalsignals C_n (a) und den mit zwei verschiedenen Hilfsfrequenzen f_{H1} und f_{H2} (Frequenzachsen b und c) in den Durchlassbereich f_0 des Filters transponierten Originalfrequenzen 3 bzw. 5

cos $n\omega_1 t$, zum andern in der linearen und weitgehend fehlerfreien Ausführung der Multiplikation. Dieses Verfahren wurde bereits in Prototypen ausgeführt, weist bis jetzt jedoch noch recht grosse Fehler auf und ist somit technisch noch nicht einsatzbereit.

3.1 Rein rechnerische Analyse

Ein Optimum an Flexibilität und Einsatzmöglichkeit bietet der computerunterstützte rechnerische Analysator, bei dem im sogenannten Fourier-Processor die mathematische Fourieranalyse durchgeführt wird. Das Prinzip ist in Fig. 8 dargestellt: Das zu analysierende Signal $f(t)$ wird zuerst in einem Sampler (Analog/Digitalwandler) mit einer gegebenen Abtastfrequenz

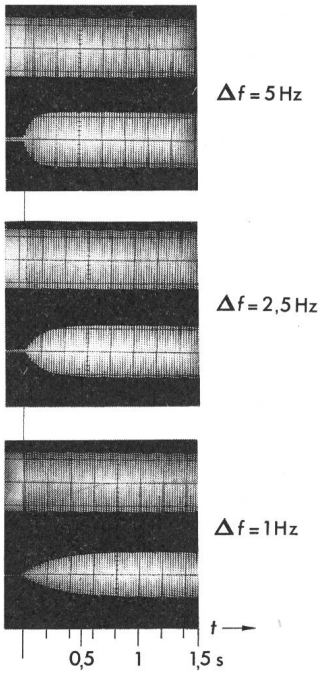


Fig. 5
Einschwingvorgang eines Filters für ein sinusförmiges Signal im Durchlassbereich in Abhängigkeit von der Durchlassbreite Δf.
Oberer Strahl: Eingangssignal, unterer Strahl: Ausgangssignal

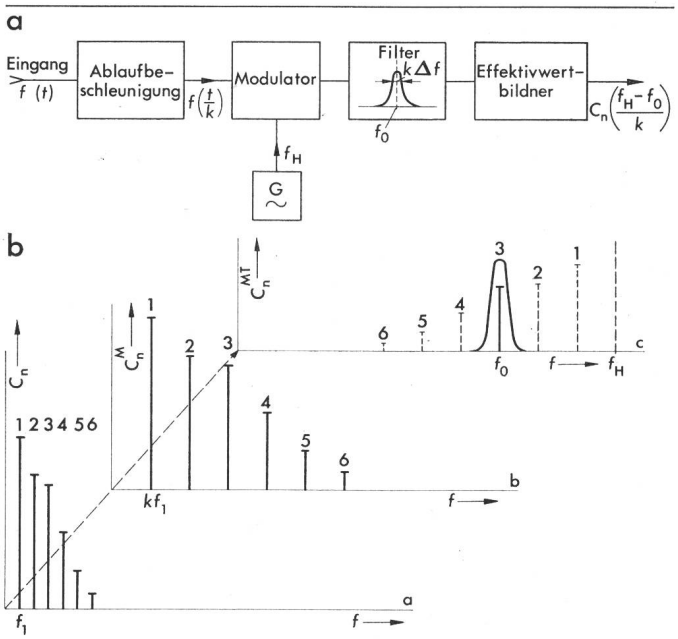


Fig. 6 «Real-Time Analyzer»: a) Blockschaltbild, b) Darstellung der Funktionsweise mit den Frequenzachsen des Originalsignals C_n (a), des um den Faktor k beschleunigten Signals (b) und des mit einer Hilfsfrequenz f_H in den Durchlassbereich des Filters (f_0) transponierten Signals (c)

f_s während einer gegebenen Zeit T_w («Fensterzeit») abgetastet, und die Werte werden gespeichert. Aus diesen Stützwerten werden dann mit Hilfe der diskreten Fouriertransformation N Koeffizienten A_n und B_n im Fourier-Processor mit einem adäquaten Rechenprogramm (gewöhnlich wird eine Fast-Fourier-Transform mit minimalem Rechenaufwand verwendet) bestimmt.

Aus der Struktur des Verfahrens und der zur Verfügung stehenden Rechenprogramme ergibt sich ein prinzipielles Problem: Die Grundperiode in der Analyse wird *nicht* vom

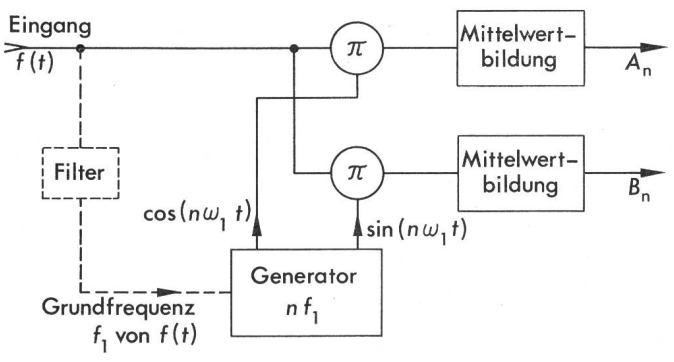


Fig. 7 Blockschaltbild des Multiplikator-Analysators zur schaltungstechnischen Durchführung der Fourieranalyse
A_n, B_n Koeffizienten der Oberwellen

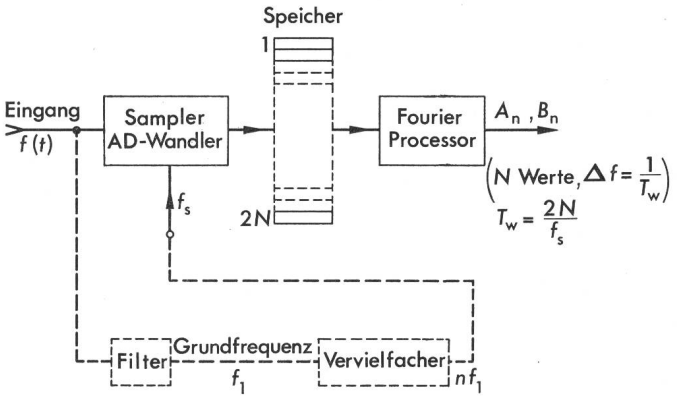


Fig. 8 Blockschaltbild eines rechnenden Analysators
f_s Abtastfrequenz
T_w Abtastdauer (Fensterzeit)
A_n, B_n Koeffizienten der Oberwellen

Signal, sondern von der Fensterbreite T_w, also der Länge des abgespeicherten Signalsegments, bestimmt, desgleichen der Frequenzschnitt, der der Analysebreite Δf im Filterverfahren entspricht. Diese erzwungene Periodizität des Signals kann zu sehr grossen Fehlern führen, falls nicht, wie in Fig. 8 gestrichelt angedeutet, die Abtastfrequenz f_s über einen Vielfacher aus der Grundfrequenz f_1 gewonnen wird. Nur auf diese Art wird auch die Fensterbreite T_w ein Vielfaches der Grundperiode T_1.

Der Hauptvorteil dieses sehr aufwendigen Verfahrens liegt darin, dass die analysierten Signale mit entsprechenden Benützerprogrammen sehr einfach weiterverarbeitet werden können, was seine Anwendung in sehr vielen Fällen rechtfertigt.

4. Zusammenfassung

Die Notwendigkeit der Frequenzanalyse in der Energietechnik kann auf Grund der zunehmenden Verzerrung der Netzspannung, hervorgerufen durch den von nichtlinearen Verbrauchern erzwungenen nichtsinusförmigen Strom, und mit Rücksicht auf die Beeinflussung anderer Verbraucher und benachbarter Installationen der Informationsübermittlung nicht mehr bestritten werden. Es stellt sich die Frage nach der Auswahl des geeigneten, d. h. dem Messproblem angepassten Messverfahrens. Wenngleich diese Auswahl von Fall zu Fall entschieden werden muss, so scheinen dem Autor drei Geräte am besten geeignet: Fourier-Transform Analyzer, Real-Time Analyzer sowie das in einem separaten Artikel in diesem Heft beschriebene neuentwickelte Gerät zur Messung diskreter Oberwellen. Bei all diesen Geräten muss darauf geachtet werden, dass neben der Frequenzauflösung Δf auch die Dynamik (Amplitudenauflösung, Genauigkeit) den speziellen Anforderungen in der Energietechnik entspricht. Nicht selten werden hier zusätzliche Probleme entstehen, weil auch eine Oberwelle mit einer Amplitude von $1^0/_{00}$ der Grundwelle, absolut gesehen, recht gross sein kann und damit insbesondere Informationsanlagen beeinflussen wird.

Auch der Sicherheit im Sinne der Starkstromtechnik muss erhöhte Beachtung geschenkt werden: Elektronische Messgeräte haben häufig das metallische Gehäuse und damit die Erde als Bezugspunkt. Für eine universelle Verwendbarkeit (z. B. Messungen zwischen Phasen oder Strommessungen in einer Phase) müssen daher ausreichend spannungsfeste Isolierverstärker oder (evtl. auch gleichstromgekoppelte) Übertrager vorgesehen werden.

Literatur

[1] *K. G. Beauchamp:* Signal processing using analog and digital techniques. London, Allen and Unwin, 1973.
[2] *E. O. Brigham:* The fast Fourier transform. Hempel Hempstead, Hertfordshire, Prentice-Hall, 1974.
[3] *R. K. Otnes* and *L. Enochson:* Digital time series analysis. New York a. o., Wiley-Interscience, 1972.
[4] *H. W. Schlüssler:* Digitale Systeme zur Signalvearbeitung. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1973.
[5] *R. G. Woschni:* Informationstechnik. Signal – System – Information. Berlin, VEB Verlag Technik, 1973.

Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. *J. Weiler,* Wiss. Adjunkt, Lehrstuhl für Industrielle Elektronik und Messtechnik der ETHZ, Physikstrasse 3, 8006 Zürich.