

**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:** 84 (1993)

**Heft:** 3

**Artikel:** Qualität der elektischen Energieversorgung : die Überwachung der Netzqualität stellt hohe Anforderungen an die Messtechnik

**Autor:** Weiler, Jean / Schreiber, Rolf

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-902665>

### **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:** 01.04.2025

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

Leistungselektronische Systeme, wie sie heute in praktisch allen elektrischen Geräten zu finden sind, haben neben vielen Vorteilen den Nachteil, dass sie die Netzspannung mehr oder weniger verzerren und so andere Geräte stören können. Damit die «elektromagnetische Verträglichkeit» in den Versorgungsnetzen trotzdem erhalten bleibt, haben die Werke die Pflicht, die Qualität der Netzspannung dauernd zu überwachen und dafür zu sorgen, dass die einschlägigen Normen eingehalten werden. Der vorliegende Aufsatz beschreibt die wichtigsten der dabei verwendeten Messmethoden und geht auf Probleme ein, welche bei solchen Messungen auftreten können.

# Qualität der elektrischen Energieversorgung

## Die Überwachung der Netzqualität stellt hohe Anforderungen an die Messtechnik

■ Jean Weiler und Rolf Schreiber

In einem Grossteil der modernen, elektrischen Geräte wird die Leistung heute elektronisch, mit Hilfe von nichtlinearen Bauelementen (z.B. Thyristoren) gesteuert. Solche Geräte bieten die Vorteile einer feinstufigen Leistungssteuerung und eines guten Wirkungsgrades, haben aber den Nachteil, dass sie die Netzspannung durch nichtsinusförmige Netzströme mehr oder weniger verzerren. Sie verschlechtern die Qualität der Energieversorgung und können potentiell sich selbst und andere Verbraucher störend beeinflussen.

In einem kürzlich erschienenen Artikel [1] wurden die Hauptprobleme einer solchen «Netzverseuchung» durch nichtlineare und geschaltete Verbraucher beschrieben und die zugehörigen Vorschriften erwähnt. Wie generell bei jedem Handel mit mess- oder wägbaren Gütern ist auch in bezug auf diese Probleme die Kontrolle der Einhaltung der Grenzwerte notwendig. Nationale und internationale Vorschriften regeln diese Grenzwerte. Ihre Einhaltung und die Bestimmung der charakteristischen Grössen erfordert jedoch eine ausgefeilte Messtechnik, welche im folgenden für die einzelnen Messgrössen besprochen wird. Häufig sind die zu erfassenden Störungen generell relativ klein – zumindest verglichen mit der Netzspannung –, so dass an die Messauflösung und die erlaubte Messunsicherheit sehr hohe Anforderungen gestellt werden müssen.

Die Messungen im Zusammenhang mit der Überwachung und Sicherung der Netzqualität finden meist (evtl. mit Ausnahme von Emissionsmessungen) im öffentlichen Netz statt. Die Aussage über das Verhalten einer Phase allein sagt dabei nicht alles aus; empfohlen werden Messungen in allen drei Phasen, wobei die Ströme und Spannungen entweder gleichzeitig oder wahlweise nacheinander zu erfassen sind. Es ist zudem, wie bei jeder Messung, ausserordentlich wichtig, auch die möglichen Fehler und deren Vermeidung sehr sorgfältig abzuschätzen.

Die Probleme solcher Messungen und die in Frage kommenden Messverfahren sollen im folgenden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, beschrieben werden. Ziel ist es, über das Verständnis der Messmethoden zu einer Aussage über die Relevanz und Repräsentativität der Ergebnisse zu gelangen. Dafür sollen zuerst einige Grundbegriffe der Signalbeschreibung aufgefrischt werden. Anschliessend können dann die einzelnen interessierenden Messgrössen beschrieben werden.

### Grundlegende Gesichtspunkte

Die Messungen der verschiedenen relevanten Grössen weisen einige gemeinsame Punkte auf:

- es sind generell Ströme und Spannungen zu erfassen und auf ein Niveau zurückzuführen, welches für eine elektronische Signalverarbeitung geeignet ist;
- für die Beschreibung sind spezielle Hilfsmittel (Fouriertransformation) notwendig, welche die Übersicht wesentlich vereinfachen.

#### Adressen der Autoren

Prof. Dr. Jean Weiler, Professur für Leistungselektronik und Messtechnik, ETH-Zentrum/ETL, 8092 Zürich, und Rolf Schreiber, Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ), Postfach, 8022 Zürich.



## Spannungsmessung

Für die Spannungsmessung sind heute verschiedene Verfahren denkbar, welche neben der Pegelanpassung auch die sicherheitsrelevante Trennung vom Netz bewirken. Am einfachsten ist natürlich der Anschluss über einen Spannungswandler, welcher die zu messende Spannung auf eine bequem handhabbare Grösse transformiert. Mit Rücksicht auf nicht spezialisierte Geräte sollte dabei die Nennausgangsspannung 5–10 V betragen. Auch bei Messungen im Niederspannungsnetz müssen damit schon Wandler eingesetzt werden. Der Frequenzgang dieser Transformatoren sollte im interessierenden Bereich (bis etwa 3 kHz für übliche Messungen) bekannt sein und idealerweise konstant sein. Dies gilt sowohl für das Übersetzungsverhältnis wie auch für die Phasendrehung bei der vorgesehenen Bürde.

Vergleichbar in der Qualität mit Spannungswandlern sind voll galvanisch getrennte Eingangsverstärker in elektronischen Geräten. Sowohl vom Frequenzgang her wie auch von der Isolation sind moderne Versionen im interessierenden Bereich voll einsetzbar. Je nach Anwendungszweck wird eine analoge Übertragung vorgenommen (Ein- und Ausgang sind gleichwertige Verläufe) oder aber bereits in der Isolierstrecke mit digitalen Signalen gearbeitet, welche dann auch direkt digital weiterverarbeitet werden können. Nicht ganz so gut sind Differentialeingänge, wie sie zum Beispiel an manchen Oszilloskopen gefunden werden. Vom Einsatz von Spannungsteilersonden ist, wegen der fehlenden galvanischen Trennung, ganz abzuraten.

## Strommessung

Bei der Strommessung stellen sich zusätzliche Probleme. Klassische Stromwandler sind im allgemeinen frequenzgangmässig vollkommen ausreichend, bringen aber unzulässige Fehler bei auch nur geringen Gleichstromkomponenten in der Messgrösse.

Da die meisten elektronischen Geräte nur Spannungseingänge aufweisen, muss der Strom in eine proportionale Spannung umgewandelt werden. Hierzu ist eine weitestgehend rein ohmsche Bürde, optimalerweise also ein Koaxialshunt, notwendig. Bei sauberem Aufbau können allerdings auch normale induktionsarme Widerstände ausreichend gute Ergebnisse liefern. Unbrauchbar ist der Abgriff der Spannung über irgendeinem weiteren Strommessgerät im Kreis, da dessen Eigeninduktivität zu nicht mehr tolerierbaren Fehlern führt (dies gilt ganz besonders für Dreheiseninstrumente, bei denen zusätzlich der ohmsche Anteil stark temperaturabhängig ist). Von Stromzangen, auch wenn sie einen Spannungsausgang aufweisen, müssen die genauen Eigenschaften bekannt sein, damit nicht zusätzliche Fehler auftreten.

Am wenigsten Probleme stellt der Einsatz von kompensierten (aktiven) Stromwandlern, bei welchen die Flusskompensation durch einen Regelverstärker auch bei Gleichstrom gewährleistet wird (Tektronix-Zangen, LEM Transfoshunt ...). Sowohl die Linearität wie auch der Frequenzgang sind hier vollkommen ausreichend.

## Signalbeschreibung im Frequenzbereich

Nach der grundlegenden Darstellung von *Fourier* lässt sich jede beliebige periodische Zeitfunktion der Grundfrequenz  $f_1$  und Periodendauer  $T_1 = 1/f_1$  darstellen durch eine Summe von einzelnen sinusförmigen Komponenten, welche als Frequenzen nur ganzzahlige Vielfache  $nf_1$  der Grundfrequenz  $f_1$  aufweisen. Diese Systematik lässt sich am Beispiel eines Stromes  $i(t)$  wie folgt formulieren:

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_1 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_1 t) \quad (1)$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \hat{i}_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n)$$

mit

$$\hat{i}_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2a)$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{-b_n}{a_n} \quad (2b)$$

$$I_n = \frac{\hat{i}_n}{\sqrt{2}} \quad (2c)$$

Die Komponenten  $a_n$  bzw.  $b_n$  lassen sich herleiten aus:

$$a_n = \frac{1}{T_1} \int_{T_1} i(t) \cos(n\omega_1 t) dt \quad (2d)$$

$$b_n = \frac{1}{T_1} \int_{T_1} i(t) \sin(n\omega_1 t) dt \quad (2e)$$

Die Zerlegung in eine Summe von sinusförmigen Komponenten hat den Vorteil, dass nun die einzelnen sinusförmigen Komponenten für sich allein betrachtet werden können. Für die Wiedergabe der Komponenten wird meist eine graphische Darstellung für Betrag und Phase verwendet (Balkendiagramm), wobei häufig der Betrag als Effektivwert ausgegeben wird. Mit Rücksicht auf den grossen Wertebereich wird zudem wahlweise nicht der natürliche (lineare) Wert verwendet, sondern es wird eine loga-

rithmierte Darstellung [Logarithmus des auf eine Bezugsgrösse bezogenen Absolutwertes oder aber in Dezibel (dB) gemäss dem Zusammenhang  $\text{dB} = 20 \log(\text{Grösse}/\text{Bezugsgrösse})$ ] benützt. Bezugsgrösse ist dabei entweder 1 Volt oder 1 Ampere oder aber der Effektivwert der Grundschwingung, d.h. im Falle von Netzmessungen die 50-Hz-Komponente der betrachteten Grösse. Man muss sich bei dieser Darstellung im klaren sein, dass 20 dB einem Faktor 10 in Spannung oder Strom entsprechen; weitere charakteristische dB-Werte zeigt die Tabelle I.

dB	Wert	dB	Wert
3	1,4..	- 3	0,7..
6	2	- 6	0,5
10	3,16..	-10	0,316
20	10	-20	0,1
40	100	-40	0,01

Tabelle I Zusammenhang zwischen absoluten Werten und logarithmischen Werten, ausgedrückt in Dezibel (dB)

## Spezifische Messgrössen und Messmethoden

In der digitalen Messtechnik werden generell Spannungen und Ströme einzeln gemessen; aus ihnen werden dann die übrigen interessierenden Grössen (Effektivwerte, Fourierkomponenten, Leistungen,...) hergeleitet. Nur selten werden analog bereits die charakteristischen Grössen gebildet und dann für eine digitale Signalverarbeitung weiter aufbereitet.

Die interessierenden charakteristischen Grössen haben eines gemeinsam: Sie sind als *Mittelwerte über eine Periode  $T_1$*  definiert; bei der Ausführung der Messung ist also streng darauf zu achten, dass diese Mittelwertbildungszeit (sie kann ohne Fehler auch ein ganzzahliges Vielfaches von  $T_1$  sein) auch strikte eingehalten wird. Die Nichteinhaltung dieser Vorschrift kann zu ganz erstaunlich falschen Ergebnissen führen.

## Effektivwert

Der Effektivwert ist definiert als

$$I_{eff} = I = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_{T_1} i^2(t) dt} \quad (3a)$$

Unter Anwendung der Fourierreihe folgt daraus

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (3b)$$

Es ist bei der Messung zu bedenken, dass viele der üblichen Universal-Messgeräte zwar den Effektivwert anzeigen, dies aber nur *unter der Annahme einer sinusförmigen*



**Messgrösse.** Diese weitverbreiteten Gleichrichterinstrumente bestimmen den Effektivwert aus dem Mittelwert des gleichgerichteten Signals gemäss Wirkkette nach Bild 1, wobei der Umrechnungsfaktor für sinusförmige Grössen (und nur für diese!) den Wert  $\pi/2\sqrt{2} = 1,11$  annimmt. Für andere Kurvenformen ist ein anderer Umrechnungsfaktor notwendig. Korrekterweise wären Operationen gemäss Bild 2 notwendig, welche in elektronischen Instrumenten mit der Anschrift Trms (True root mean square, Echteffektivwert) vorgenommen werden. Nur bei diesen Verfahren wird tatsächlich der Effektivwert angezeigt.

Als Beispiel sei ein Strom betrachtet, wie er bei Netzgeräten mit kapazitiver Glättung (siehe beispielsweise Bild 4 in [1]) auftritt, wobei angenommen wird, dass die gesamte Stromleitdauer  $T$  und die Periodendauer der Netzspannung  $T_1$  ist. Für diesen Stromverlauf zeigt das Universalinstrument tatsächlich den Wert  $I \cdot \sqrt{TT_1}$  an. Bei einem realistischen Verhältnis von  $T/T_1 = 1/4$ , ist die Anzeige also um einen Faktor 2 verfälscht.

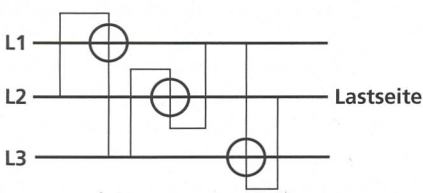
**Leistungen**

Die Wirkleistung berechnet sich aus grundlegenden physikalischen Erwägungen zu

$$P = \frac{1}{T_1} \int_{T_1} u(t) \cdot i(t) dt$$

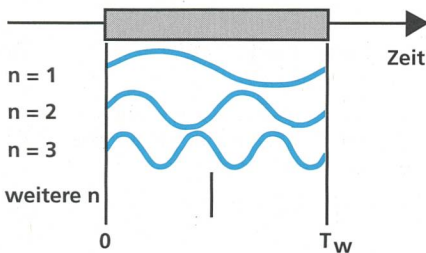
$$= \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n \tag{4}$$

Zur Wirkleistung tragen also nur die gleichfrequenten Komponenten in Strom und



**Bild 4 Blindleistungen im Dreiphasennetz**

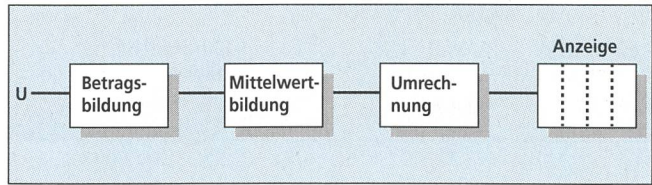
Mögliche Schaltung zur Bestimmung der Blindleistungen im Dreiphasen-Dreileiternetz



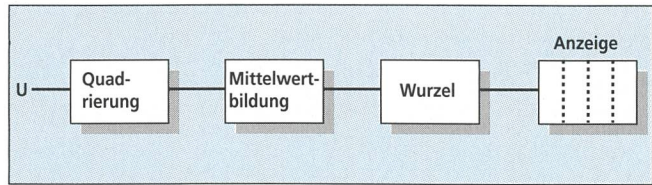
**Bild 5 Zum Problem der Frequenzanalyse eines periodischen Signals**

$T_W$  Zeitausschnitt des zu analysierenden Signals. Dargestellt sind mögliche Sinuskomponenten zwischen 0 und  $T_W$ ; analog sind Cosinuskomponenten möglich

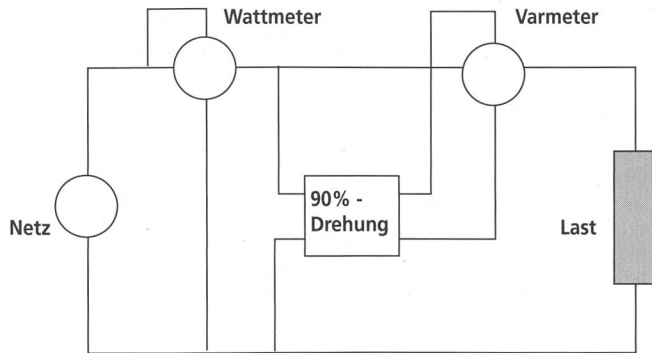
**Bild 1 Wirkkette eines konventionellen Universalinstrumentes**



**Bild 2 Wirkkette eines echten Effektivwertinstrumentes**



**Bild 3 Konventionelle Schaltungen zur Messung der Wirkleistung und der Blindleistung**



Spannung entsprechend ihrer Phasenverschiebung  $\varphi_n$  bei. Die Messung der Wirkleistung (wie auch die Messung der Wirkarbeit) ist mit konventionellen Wattmetern (und Energiezählern) meist auch bei verzerrten Kurvenformen unproblematisch. Schein- und Blindleistungsmessungen sind hingegen mit einem grossen Fragezeichen zu versehen, sogar dann, wenn nur eine der beiden Grössen (meist der Strom) von der Sinusform merklich abweicht. Für die Blindleistungsmessung wird auch heute noch praktisch nur die Schaltung nach Bild 3 mit einer 90°-Phasendrehung der Spannung eingesetzt (klassische Varmeter-Schaltung), welche nur bei sinusförmigen Grössen korrekt ist. Bei nicht-sinusförmigem Strom wird hier nur ein Teil der Blindleistung bestimmt, nämlich derjenige, welcher zur Grundfrequenz der Spannung gehört, d.h.  $U \cdot I_1 \sin \varphi_1$ , wo der Index 1 die zur Grundschwingung gleichfrequenten Komponenten bezeichnet. Dies führt zu sehr schwer interpretierbaren Messresultaten, wenn anschliessend die Scheinleistung  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$  gebildet wird. Die Messung nach Bild 3 ergibt für die Scheinleistung den Wert  $S_I$ :

$$S_I = \sqrt{P^2 + Q_c^2} = U \cdot I_1 \tag{5a}$$

Richtig wäre aber der Wert:

$$S = U \cdot I = U \cdot \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2} > S_I \tag{5b}$$

Der Leistungsfaktor ist also auch nicht mehr gleich einem  $\cos \varphi$  (welchem  $\varphi$  !?), sondern muss ersetzt werden durch den generelleren Begriff  $\lambda = P/S$ .

In Dreiphasensystemen sind alle bekannten Schaltungen zur Messung der gesamten Wirkleistung zulässig und auch korrekt. Die Blindleistung sowie die Scheinleistung dagegen sind im generellen Fall nicht mehr eindeutig definiert, so dass auch über ihre Messung keine eindeutige Aussage gemacht werden kann. Verwendet man die üblichen, einphasigen Varmeter mit 90° Phasendrehung, so sind die Ergebnisse wie oben angeführt unbrauchbar. Die andere, viel verwendete Schaltung nach Bild 4, bei welcher mit dem Strom einer Phase die Spannung zwischen den beiden andern Phasen verknüpft wird, erbringt einen Messwert für die Blindleistung, welcher einer möglichen sinnvollen Definition entspricht; dieser ist allerdings nicht mit der Definition der Scheinleistung kohärent.

**Frequenzanalyse**

Die Durchführung der Fouriertransformation von Strom und Spannung bildet das eigentliche Rückgrat vieler Messungen, so dass eine nähere Betrachtung gerechtfertigt ist. Bei den hier vorliegenden Frequenzen wird sie im allgemeinen digital durchgeführt, wobei ein speziell schneller Rechenalgorithmus, die Fast Fourier Transform FFT, zum



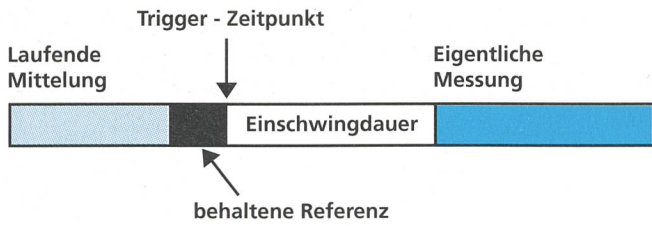


Bild 6 Prinzip der zeitlichen Differenzmessung

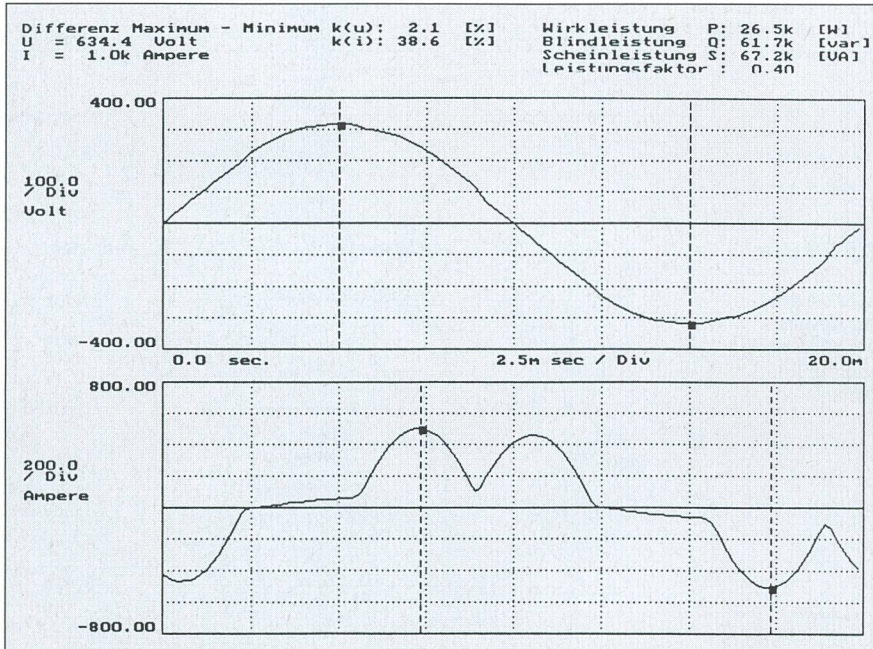


Bild 7 Netzzeitiger Spannungs-/Stromverlauf eines gesteuerten Gleichstrommotors

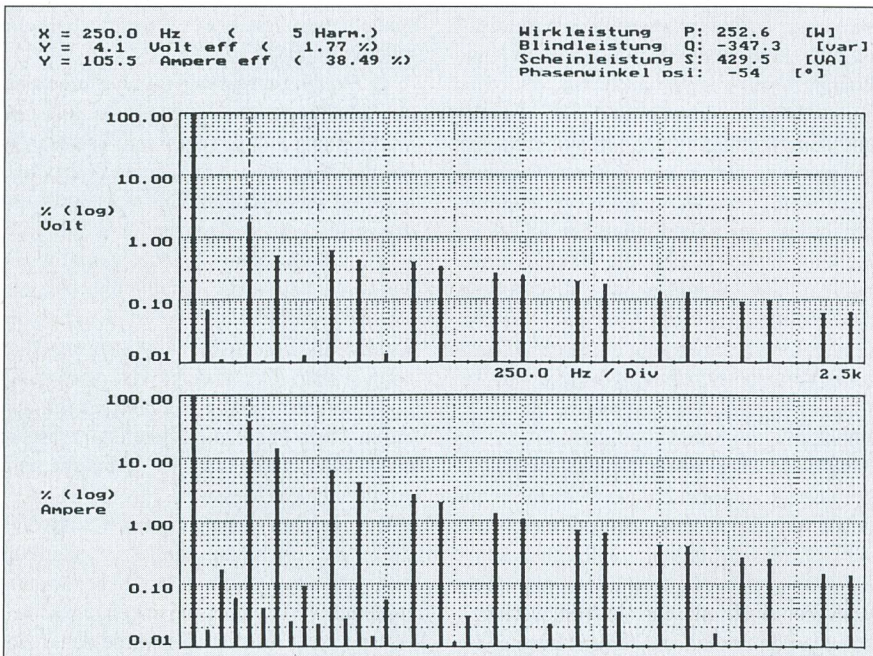


Bild 8 Spektrum der Größen von Bild 7

Einsatz gelangt. Derartige Analytoren sind seit langem für allgemeine Anwendungen erhältlich und genießen einen ausgezeichneten Ruf, so dass sie oft irreflektiert eingesetzt werden. Unabhängig von der gerade betrach-

teten Implementation sind allen Verfahren einige Punkte gemeinsam:

**Abtastung:** Digitale Systeme können nur diskontinuierlich, d.h. auf zeitdiskreten Mu-

stern (Samples) des zu analysierenden Signals, und nicht kontinuierlich operieren. Generelle Überlegungen legen die notwendige Abtastfrequenz mit Rücksicht auf die zu analysierenden Signale fest. Theoretisch lässt sich nur sagen, dass die Abtastfrequenz grösser sein muss als das doppelte der vorkommenden höchsten Frequenzkomponente des Signals (in der Regel wird diese eindeutig durch ein sogenanntes Antialiasing-Filter in der analogen Eingangsstufe festgelegt). Üblich ist ein Faktor 2,5 bis etwa 4.

**Zeitfenster:** Die Transformation kann nicht kontinuierlich erfolgen (siehe Definition der Fourierreihe), sondern basiert auf einem zeitlichen Ausschnitt der Länge  $T_W$  des zu analysierenden Signals. Dies ist symbolisch in Bild 5 dargestellt. Das Zeitfenster der Länge  $T_W$  legt zwingend für die Berechnung auch die Grundperiodendauer  $T_W$  und die Grundfrequenz  $f_1$  der Analyse fest. Nur Frequenzkomponenten, welche, wie in Bild 5 skizziert, ein ganzzahliges Vielfaches von  $1/T_W$  sind, werden berechnet. Bei der dargestellten Analyse bietet dies keine Probleme, da die Fensterlänge so gewählt wurde, dass eine ganze Anzahl Schwingungen in ihr enthalten sind; die Vorschrift der Ganzzahligkeit für die Frequenz des analysierenden Signals ist also eingehalten.

**Schlussfolgerungen:** Die Frequenzauflösung ist durch die Breite  $T_W$  gegeben, da nur ganzzahlige Vielfache von  $1/T_W$  bestimmt werden. Daraus folgt:

- Bei der Analyse von *periodischen* Signalen ist  $T_W$  so zu wählen, dass eine ganze Anzahl von Perioden darin enthalten ist. Da die Anzahl der Abtastwerte im Fenster vom Algorithmus vorgegeben ist (meist 512, 1024 oder 2048 Stützpunkte), muss die Abtastfrequenz aus der Grundfrequenz des Signals hergeleitet werden (synchrone Abtastung). Die häufig angewandte Gewichtung des zeitlichen Ausschnitts (z.B. Hanning-Fenster) kann das Ergebnis nur verschlechtern und ist also zu vermeiden.

- Bei der Analyse von *nichtperiodischen* Signalen kann die Abtastfrequenz im Rahmen der durch die maximale Signalfrequenz gegebenen Forderungen beliebig gewählt werden; das Zeitfenster muss «möglichst lang» sein, mindestens so lang, dass der ganze interessierende Vorgang darin enthalten ist. Hier ist eine Fenstergewichtung mit Vorsicht erlaubt.

## Messung der Pegel von Netzverzerrungen

Die Messung vorhandener Verzerrungen bezieht sich meist nur auf jene der Netzspannung zur Überwachung der Kompatibilitätspegel. Die Werte der Harmonischen und Interharmonischen liegen im Bereich weniger Prozent der Grundschwingung und damit der gesamten Netzspannung. Messgeräte müssen



also eine sehr hohe Dynamik und Auflösung aufweisen. Die notwendigen Eigenschaften sind in der Anleitung IEC 1000-4-7 niedergelegt und verlangen Auflösungen von besser als ein Promille mit Genauigkeiten von einigen Prozent. Es versteht sich, dass die Messungen in allen drei Phasen der Energieversorgung durchgeführt werden sollen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Als weitere Erschwernis kommt hinzu, dass in speziellen Fällen nicht nur Harmonische erfasst werden müssen, sondern gegebenenfalls auch Interharmonische, was relativ lange Messfenster  $T_W$  für eine genügende Auflösung benachbarter Frequenzkomponenten bedingt. Typisch werden gemäss IEC zum Beispiel 3 Hz Auflösung verlangt, d.h.  $T_W \approx 300$  ms. Wünscht man den ganzen Niederfrequenzbereich bis zu etwa 2500 oder 3000 Hz zu überstreichen, so sind Abtastfrequenzen von mehr als 6 kHz notwendig, d.h. Speichertiefen für  $T_W$  von über 2000 Punkten. In diesem Falle ist es angezeigt, die Abtastfrequenz aus einem quarzstabilisierten Oszillator zu erzeugen, damit absolute Frequenzmessungen (nicht relativ zur Netzfrequenz) möglich sind. Sollen nur Harmonische erfasst werden, so reicht eine Periode als Messfenster, wobei dann die Abtastfrequenz vorzugsweise aus der Netzfrequenz durch Frequenzvervielfachung gewonnen wird.

Eine einzelne Messung sagt als Momentanaufnahme allerdings noch nichts aus, sondern es müssen Langzeitmessungen als Mittelwerte der harmonischen Pegel gebildet werden. Es ist zu erwarten, dass aufgrund einer internationalen Norm die Grundmittlungsdauer 10 Minuten betragen wird, woraus dann die Werte über Tage oder Wochen hinweg abgeleitet werden.

### Spezialmessungen

Noch schwieriger wird die Überwachung von Spannungseinbrüchen sowie von kurzzeitigen Spitzen, da die Geräte zu deren Messung äusserst immun gegen Störungen sein müssen und auch bei vollständigem Spannungsunterbruch weiter funktionieren müssen. Auf diese Geräte soll aber hier nicht weiter eingegangen werden.

Neben den bis jetzt erläuterten Messgrössen sind häufig noch weitere Grössen von Interesse, welche nachfolgend kurz beschrieben werden. Für die Bestimmung dieser Grössen sind spezielle Messverfahren erforderlich.

### Durch Zusatzlast verursachte Verzerrungen

Die Schweizer Norm SN 413600 schreibt Grenzwerte für die individuellen Verzerrungen durch einen gegebenen Verbraucher vor, welche nicht überschritten werden dürfen.

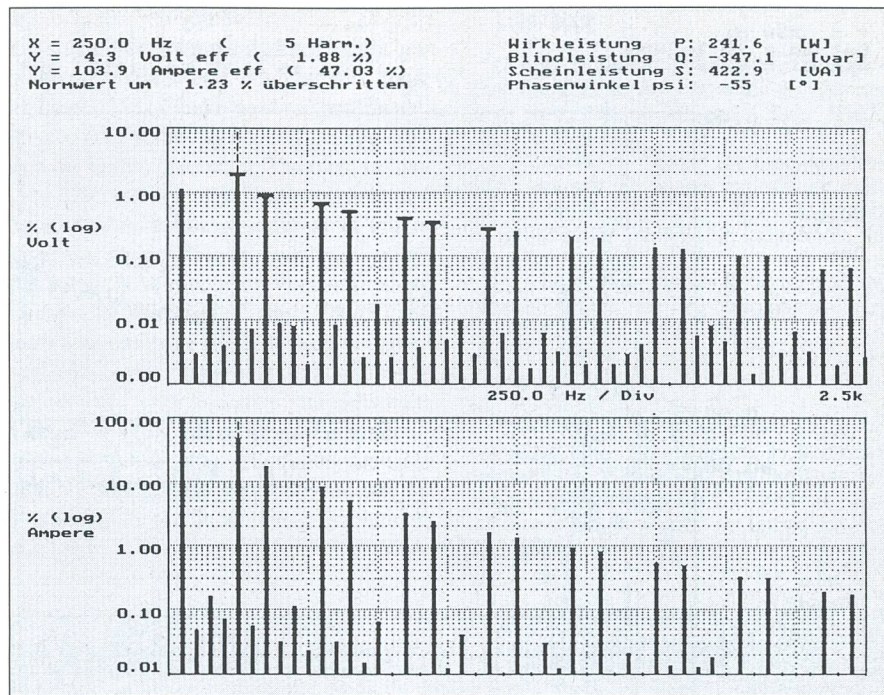


Bild 9 Spektrum der Netzrückwirkungen

Das Bild zeigt die Anteile der einzelnen Harmonischen für Spannung und Strom, verursacht durch den Gleichstrommotor gemäss Bildern 7 und 8. Hinweis: Diese Last verursacht Verzerrungen, welche die zulässigen Pegel gemäss SN 413600 überschreiten; für die Messung wurde die zugehörige Saugkreisanlage ausgeschaltet

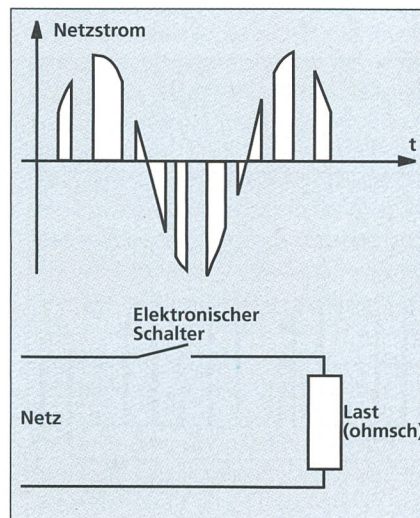


Bild 10 Netzimpedanzmessung

Vereinfachte charakteristische Kurvenform des Netzstromes zur Netzimpedanzmessung

Diese Vorschrift ist sehr sinnvoll, verlangt aber ein sehr spezielles Messverfahren, da die Oberschwingungen der einzelnen Verbraucher sich vektoriell, d.h. entsprechend ihrer Phasenlage, addieren. Die Zuschaltung eines zusätzlichen nichtlinearen Verbrauchers kann somit sehr wohl, je nach momentanem Netzzustand (momentanen Harmonischen), eine Vergrösserung oder eine Verringerung der einzelnen Oberschwingungen bewirken. Eine Aussage über den Beitrag eines

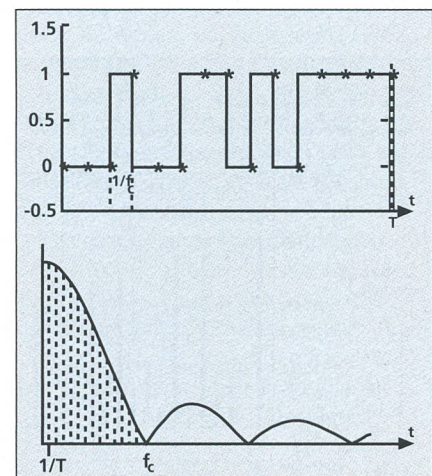


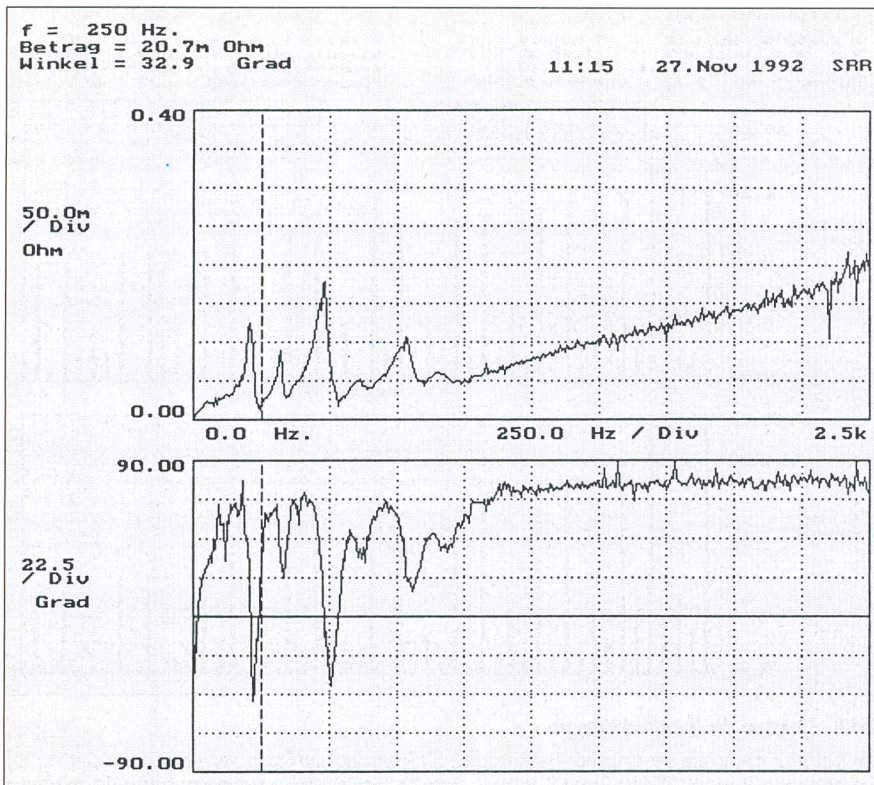
Bild 11 Pseudozufallsfolge und charakteristisches Spektrum

Linien-Spektrum: Umhüllende und einige Linien (nur für positive Frequenzen) gezeigt!

definierten Verbrauchers ist mit einer solchen Messung nicht möglich. Es wurde daher ein spezielles Messverfahren entwickelt und realisiert, welches die Identifikation des realen Beitrages einer definierten Last gestattet [2]. Das Prinzip dieses Messverfahrens kann summarisch wie folgt (siehe Bild 6) beschrieben werden:

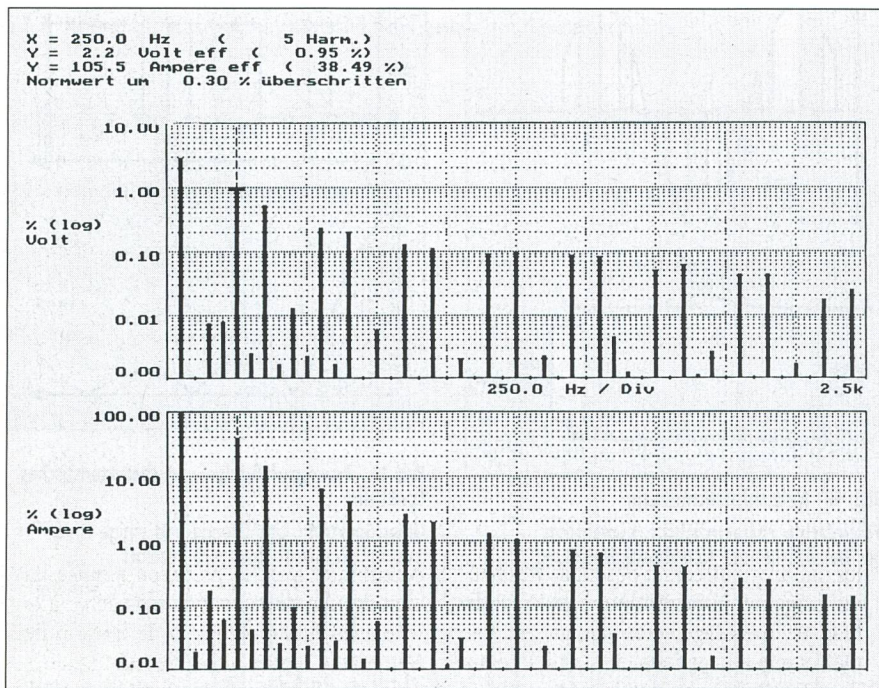
- Vor dem Triggerzeitpunkt, d.h. vor dem Einschalten der interessierenden Last, wird





**Bild 12 Netzimpedanz am Netzanschlusspunkt**

Netzimpedanz pro Polleiter am Netzanschlusspunkt des Motors gemäss Bild 7 mit zugeschalteter Saugkreisanlage



**Bild 13 Gerechneter Oberschwingungsbeitrag**

Der gerechnete Oberschwingungsbeitrag resultiert aus dem Strom gemäss Bild 7/8 und der Netzimpedanz gemäss Bild 12

laufend die mittlere Netzspannung bestimmt. Dabei wird jeweils eine Referenz-Netzperiode aus dem Mittelwert der einzelnen Netzperioden der letzten 64 Perioden erzeugt und abgespeichert.

– Nach dem Auftreten einer markanten Stromänderung (hervorgerufen durch das Einschalten der Last) im Stromkanal wird diese Referenzkurvenform eingefroren. Die Spannungs- und Strommessung wird aber

weitergeführt und insgesamt über 8 Sekunden abgespeichert. (Eine längere Messzeit wäre zeitweise erwünscht; sie würde jedoch auf Kosten der Repräsentativität der Messergebnisse gehen, da bereits kleine Anfangsphasenfehler der Referenzform sich bei langen Verzögerungszeiten zu unhaltbar grossen Fehlern aufsummieren. Um dieses Problem zu lösen, wurde eine manuelle Triggerung vorgesehen, so dass längere Messungen in mehreren Intervallen vorgenommen werden können.)

– Anschliessend wird die Differenz zwischen den Momentanwerten (zeitlicher Verlauf) der realen Spannung und der Referenzspannung gebildet. Aus dieser Differenz ist es schliesslich möglich, mit der notwendigen Genauigkeit den Beitrag der betrachteten Last zum Oberschwingungsgehalt der Netzspannung zu bestimmen. Eine weitere Verbesserung kann natürlich mit Mittelwertbildung über mehrere Messungen erhalten werden.

Die Bilder 7–9 vermitteln als Beispiele einige Messergebnisse für die nach dem Einschalten eines Gleichstrommotors auftretenden zusätzlichen Verzerrungen.

## Netzimpedanzmessung

Auch die Messung der an einem gegebenen Anschlusspunkt vorhandenen Ersatzimpedanz des Netzes lässt sich nicht mit konventionellen Messgeräten durchführen. Für diese Messung sind verschiedene Verfahren diskutiert worden (siehe z.B. [3] und [4]), denen allerdings der Nachteil einer langen Messzeit anhaftet. Als Ergänzung zum oben beschriebenen Messgerät wurde daher eine Erweiterung realisiert, mit welcher diese Grösse im Frequenzbereich bis 2500 Hz direkt und innert kurzer Zeit gemessen werden kann. Auch ihr liegt das Prinzip der Differenzmessung zugrunde. Das Messverfahren wurde erstmalig in einer Dissertation an der ETHZ entwickelt [5]. Zur Messung wird dem Netz ein stark-nichtsinusförmiger Strom entnommen, wie in Bild 10 prinzipiell skizziert ist. Im digitalen Spannungsanalysator wird als Steuersequenz des Schalters eine modifizierte Pseudozufallsfolge (PRBS) eingesetzt, wie sie in der angegebenen Dissertation vorgeschlagen und untersucht worden ist.

Als Beispiel sei in Bild 11 eine kurze PRBS (15 Elemente) dargestellt. Die Übergänge folgen mit einer Clockfrequenz  $f_c$ , die gesamte Sequenz wird dann eine Länge  $T$  aufweisen. Im Spektrum treten einzelne Linien im Abstand  $1/T$  auf (Linienspektrum, da sich die PRBS mit der Periode  $T$  wiederholt), eine erste Nullstelle der Amplituden liegt bei einer Frequenz  $f_c$ .

Jede einzelne Frequenzkomponente des Stromes hat einen entsprechenden Spannungsabfall über der bei dieser Frequenz wirksamen Netzimpedanz zur Folge (die



Netzimpedanz wird als linear angenommen, so dass Superposition erlaubt ist). Die simultane Frequenzanalyse der Netzspannung und des Stromes ergeben dann die einzelnen sinusförmigen Komponenten und gestatten damit die Bestimmung der Netzimpedanz bei all den erhaltenen Frequenzen, also die Frequenzabhängigkeit der Netzimpedanz. Problematisch wird dieses Verfahren allerdings, wenn das Netz bei der betrachteten Frequenz bereits nicht mehr vernachlässigbare Störpegel aufweist, da diese auch in die Messung eingehen. Dieses Problem kann gut gelöst werden, indem einerseits auf die Differenzmessmethode zurückgegriffen wird, andererseits mehrere Messungen ausgeführt und gemittelt werden. Wegen der streuenden Phasenlagen der netzeigenen Störungen mitteln sich die nicht vom Messstrom herrührenden Anteile relativ schnell zu Null, so dass nur die von der Messung erzeugten Komponenten eine Rolle spielen. Lediglich bei 50 Hz ist die Störung immer noch grösser als die eigentliche Messgrösse; damit wird dieser Messpunkt generell unbrauchbar. Er kann jedoch durch eine Medianfilterung aus benachbarten Werten (z.B. zwischen 40 und 60 Hz) approximiert werden.

Damit die Frequenzauflösung genügend fein wird, muss die Dauer  $T$  der Sequenz und damit auch das Zeitfenster für die Fouriertransformation allerdings wesentlich grösser sein als die Netzperiode. Die Clockfrequenz, welche den ersten Nulldurchgang des Spektrums bestimmt, sollte einiges grösser sein als die höchste noch interessierende Frequenz in der Analyse der Netzimpedanz, damit eine genügende Anregung noch bei dieser Frequenz auftritt. Aus Kompatibilitätsgründen wird auch für die Clockfrequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz gewählt.

Im erwähnten Gerät wurde eine maximale Auflösung  $1/T$  von  $3,125 \text{ Hz} = 50/16 \text{ Hz}$  implementiert, d.h. die Messsequenz erstreckt sich über 16 Netzperioden oder 320 ms, so dass eine momentane Erfassung der Netzimpedanz gewährleistet ist. Kennt man die Netzimpedanz und den Strom einer Last, so können direkt auch die dadurch hervorgerufenen individuellen Oberschwingungsbeiträge in der Spannung bestimmt werden (auch diese Möglichkeit ist im erwähnten Gerät verfügbar). In den Bildern 12 und 13 sind charakteristische Messergebnisse aus der Anlage gemäss Bild 7 mit zugeschalteter Kompensationsanlage wiedergegeben.

## Zusammenfassung

Die vorgehenden Ausführungen gingen auf die aktuellen Probleme der Netzverzerrung durch nichtlineare Lasten ein. Typische Vertreter (und «Alleinschuldige») sind Systeme der Leistungselektronik, deren Vorteile aber derart unbestreitbar sind, dass ihr Ein-

satz in jedem Fall gerechtfertigt ist. Lediglich einer Minimierung der dadurch möglicherweise hervorgerufenen Störungen ist Sorge zu tragen. Dies sollte bereits auf der Herstellerseite durch eine Begrenzung der Emissionen der Geräte geschehen. Trotzdem ist aber eine Überprüfung der Netzverzerrung auf Seite der Netzbetreiber noch immer unumgänglich, um entscheiden zu können, ob im Einzelfall die notwendigen Vorschriften und Grenzwerte eingehalten sind. Damit sind auch entsprechende spezielle Messverfahren und Messgeräte notwendig geworden, wie sie aufgrund einer Initiative von Schweizer Energieversorgungsunternehmen (Elektrizitätswerke des Kantons Zürich) an der ETH Zürich entwickelt und anschliessend von der Privatindustrie zur Serienreife gebracht wurden [2].

## Literatur

- [1] J. Weiler und R. Schreiber: Qualität der elektrischen Energieversorgung – Merkmale der Netzspannung und Netzurückwirkungen. Bull. SEV/VSE 84(1993)1, S. 35–41.
- [2] R. Schreiber: Digitaler Spannungs-Analysator (DSA), Messgerät zur Analyse von Netzurückwirkungen. Bull. SEV/VSE 82(1991)15, S. 39–43. Das Gerät ist im Verkauf bei der Firma Michels Datentechnik, Wädenswil.
- [3] J. Weiler: Experimentelle Bestimmung der Frequenzabhängigkeit von Quellenimpedanzen. Bull. SEV/VSE 68(1977)20, S. 1081–1086.
- [4] R. Schreiber: La mesure de l'impédance des réseaux basse tension en fonction de la fréquence. Bull. SEV/VSE 82(1991)23, pp. 49–53.
- [5] M. Meyer: Experimentelle Bestimmung der frequenzabhängigen Quellenimpedanz im Niederspannungsnetz. Diss. Nr. 8689, ETH Zürich. Die Dissertation wurde ausgeführt am Lehrstuhl für Industrielle Elektronik und Messtechnik unter der Leitung von Prof. Dr. R. Zwicky.

## Qualité de l'alimentation en électricité


### La surveillance de la qualité de la tension de réseau pose de hautes exigences à la métrologie

La commande de la puissance d'une part importante des appareils électriques modernes fait appel aujourd'hui à des composants électroniques non linéaires (p.ex. thyristors). De tels appareils offrent une commande à régulation sensible de la puissance et un bon rendement, mais ils ont l'inconvénient de distordre plus ou moins la tension de réseau par des courants de ligne non sinusoïdaux, et de pouvoir perturber d'autres consommateurs. Pour conserver la «compatibilité électromagnétique» dans les réseaux d'alimentation, les entreprises d'électricité sont tenues de surveiller en permanence la qualité de la tension de leurs réseaux, et de veiller au respect des normes nationales et internationales s'y rapportant [1].

Comparées à la tension de réseau, les perturbations qu'il s'agit de détecter sont en général relativement petites, et font que les mesures à effectuer posent de très hautes exigences à la résolution et l'incertitude de mesurage, cela demandant une métrologie perfectionnée. L'article entre dans les problèmes spéciaux dont il faut tenir compte lors de la mesure de valeurs caractéristiques (moyennes sur une période) des tensions et des courants non sinusoïdaux. Il donne aussi une introduction à la représentation des signaux périodiques et des moyennes correspondantes au moyen des séries de Fourier (formules 1–5), car celles-ci forment aujourd'hui la base de nombreuses méthodes de mesure.

Enfin, on décrit en détail une méthode de mesure développée à l'EPFZ, qui permet d'identifier et de mesurer les distorsions de la tension de réseau causées par un consommateur déterminé [2]. Lors d'une mesure effectuée selon cette méthode (voir figure 6), on génère et enregistre en permanence, jusqu'au moment de l'enclenchement de ce consommateur, une période de référence du réseau à partir de la moyenne de chacune des 64 dernières périodes. Après l'apparition d'un changement marquant du courant causé par l'enclenchement de cette charge, la forme de cette courbe de référence est mémorisée. On continue cependant de mesurer le courant et la tension, et enregistre au total sur 8 secondes. A partir de la différence entre les valeurs momentanées (allure dans le temps) de la tension réelle et de la tension de référence, on peut alors déterminer, avec la précision requise, la contribution de la charge considérée à la teneur en harmoniques de la tension de réseau. Les figures 7–9 donnent quelques exemples de résultats de mesure obtenus à l'aide d'un appareil mesurant selon cette méthode [2] les distorsions supplémentaires apparaissant après l'enclenchement d'un moteur à courant continu. Les auteurs décrivent finalement comment cet appareil peut être équipé pour mesurer l'impédance équivalente sur le point de connexion pour des fréquences allant jusqu'à 2500 Hz [5] (figures 10–13).





Il n'y a qu'une chose  
que COSSONAY ne  
puisse pas faire avec  
ses câbles EPR...

*Les câbles de la Vie*

**COSSONAY**

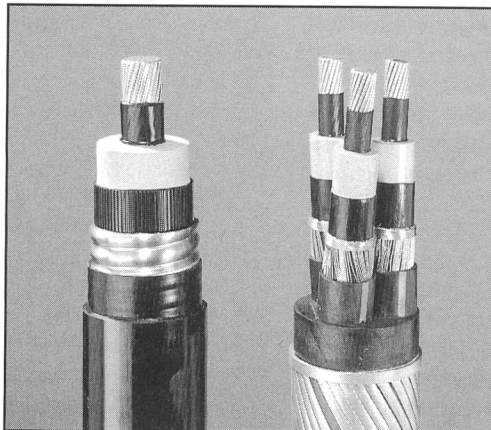
**... c'est une statistique des défauts !**

Depuis 17 ans que COSSONAY a introduit l'EPR sur le marché, plus de 6'000 km de câbles de 10 à 150 kV ont été fabriqués. **Aucun défaut** de fonctionnement n'a été constaté à ce jour.

Des câbles que nos clients continuent de choisir pour leurs avantages exceptionnels:

- résistance aux « arborescences d'eau »
- résistance aux températures de service élevées
- flexibilité

*COSSONAY,  
l'art de maîtriser  
les techniques avancées.*



*Câbles EPR unipolaire GCUW-T 132 kV  
et tripolaire GKT-F 20 kV*

CABLERIES & TREFILERIES DE COSSONAY S.A.  
1305 COSSONAY-GARE