

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:	80 (1989)
Heft:	13
Artikel:	Kommunikationssysteme für die Führung und Überwachung von elektrischen Energieverteilnetzen
Autor:	Leuthold, P. E.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-903690

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>

Kommunikationssysteme für die Führung und Überwachung von elektrischen Energieverteilnetzen

P.E. Leuthold

Die Forderung nach einem sparsamen Energieverbrauch zwingt die Elektrizitätswirtschaft, dem Problem der optimalen Führung und Überwachung der Energieverteilung mehr Aufmerksamkeit zu schenken. Die hiezu notwendige Datenkommunikation ist von entscheidender Bedeutung und bildet den Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Neben einer Übersicht über die verschiedenen Übertragungsmedien und Systemkonzepte wird vor allem die Möglichkeit der Informationsübertragung auf dem Niederspannungsnetz behandelt.

Les exigences posées en matière d'utilisation économe de l'énergie obligent les entreprises électriques à vouer une attention accrue au problème d'une conduite et surveillance optimales de la distribution d'énergie. La communication des données nécessaire dans ce contexte revêt une importance décisive et constitue l'objet du présent travail. En plus d'un aperçu des diverses voies de transmission et concepts de système on traitera surtout la possibilité de la transmission d'informations sur le réseau basse tension.

Adresse des Autors

Prof. Dr. Peter E. Leuthold,
Institut für Kommunikationstechnik,
ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Die Elektrizitätswerke sind heute in vermehrtem Masse gezwungen, sich über eine optimale Nutzung der elektrischen Energie auszuweisen. Dies bedeutet eine Entwicklung zu automatisch geführten Verteilnetzen mit geregelter Lastverteilung bis hin zum Kleinverbraucher. Hierzu müssen die Kontrollzentren einerseits über eine ausreichende Fernwirkkapazität zur Steuerung von Schaltern und anderseits über genügend Informationen bittreffend den aktuellen Netzzustand und den momentanen Energiebedarf der einzelnen Lasten verfügen. Entsprechend leistungsfähige Kommunikationssysteme bilden offenbar die Voraussetzung einer optimalen Energieverteilung.

Mit einer grossen Übertragungskapazität lassen sich aber im automatischen Verteilnetz neben dem erwähnten sparsamen Energieverbrauch noch andere Ziele anvisieren. So denkt man beispielsweise an eine Fernablesung von Energiezählern, die natürlich mit einer erheblichen Personaleinsparung verbunden wäre. Durch eine dauernde Überwachung des Netzes einschliesslich der Verbraucher würde auch die Sicherheit der Energieversorgung angehoben.

Bekanntlich arbeiten die heute in Betrieb stehenden Verteilnetze vorwiegend mit *Einwegkommunikation*, welche eine Steuerung von Schaltern und Verbrauchergruppen so ermöglicht, dass im Mittel eine befriedigende Anpassung der zeitvariablen Lastcharakteristik an die verfügbaren Quellen erfolgt. Eine momentane Feinregulierung und Überwachung erfordert laufend Rückmeldungen über den Ist-Zustand des Netzes und der Verbraucher und bedarf damit einer *Zweiwegkommunikation*. Der Schritt von der Einweg- zur Zweiwegkommunikation ist vom Aufwand her gesehen sehr gross, weil das Informationsaufkommen zu-

folge der Vielzahl von Verbrauchern enorm anwächst.

Im Hinblick auf die Kosten der Informationsübertragung, die möglichst gering gehalten werden sollen, stellt sich natürlich die Frage, welche *Übertragungsmedien* überhaupt in Frage kommen. Dabei ist zwischen leitungsgebundenen und drahtlosen Medien zu unterscheiden:

Leitungsgebundene Übertragungsmedien

- Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetz (Freileitungen, Kabel)
- Öffentliches Telefonnetz, ISDN und später Breitband-ISDN (Aderkabel, Koaxialkabel, Glasfasern)
- Kabelfernsehnetz (Koaxialkabel, Glasfasern)
- In das Verteilnetz integrierte Glasfasernetze

Drahtlose Übertragungsmedien

- Funknetze (Langwellen, VHF)
- Richtstrahlverbindungen
- Rundfunk und Fernsehen («Huckepack»)

Auf den ersten Blick liegt es nahe, das *Energieverteilnetz* gleichzeitig als Informationsübertragungsnetz zu benützen. In der Tat macht man davon auch sehr regen Gebrauch (Trägerfrequenztelephonie auf Hochspannungsleitungen im Langwellenbereich, Rundsteuerungen im Mittel- und Niederspannungsnetz bei einigen 100 Hz), aber aus Gründen, die später noch näher betrachtet werden, handelt es sich vorwiegend nur um Einwegkommunikationssysteme. Zweiwegkommunikation ist selbstverständlich möglich mittels Datenübertragungs- und Fernwirkdiensten der öffentlichen PTT-Netze. Aus Kapazitäts- und Kostengründen kommt dies heute auf breiter Basis kaum in Frage, dürfte aber später mit der Einführung des ISDN und gar des Breitband-ISDN

aktuell werden. Die neuerdings zusammen mit Hauptenergieversorgungsleitungen verlegten Glasfasern stellen ein ideales Übertragungsmedium für die Zweiwegkommunikation dar. Der Ausbau zu einem alle Verbraucher umfassenden Netz wäre jedoch viel zu teuer. Schliesslich erweist sich die Benützung von Kabelfernsehnetzen insfern als problematisch, weil die prozentuale Erschliessung der Verbraucher regional sehr unterschiedlich ist.

Die Verwendung *drahtloser Übertragungsmedien* ist grundsätzlich fragwürdig, da die begrenzte Bandbreite des Äthers in zunehmendem Masse den mobilen Kommunikationsdiensten vorbehalten bleiben sollte. Drahtlose Einwegkommunikation zum Verbraucher wird dennoch z.B. in USA eingesetzt (Radio Switch, VHF-Bereich). Richtstrahlverbindungen kommen allein schon aus preislichen Gründen nur für die Kommunikation zwischen grösseren Kontrollzentren und Energieerzeugungsanlagen in Frage. Ausgedehnte Experimente, Rundsteuersignale in die gewöhnlichen Rundfunk- und Fernsehsignale einzufügen, werden in England gemacht (Radio Teleswitching, BBC Sound Broadcast, 200 kHz).

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass verschiedene Übertragungsmedien *kombiniert* werden können. Relativ erfolgversprechend ist z.B. die Zweiwegkommunikation zwischen einem Kontrollzentrum auf der Sekundärseite des Quartier- oder Gebäudetransformators und den angeschlossenen Verbrauchern via Niederspannungsnetz, wobei dann die Verbindung zu einer übergeordneten Zentrale auf dem öffentlichen Telefonnetz erfolgt (Mainsborne Telecontrol, England).

Die Verwendung klassischer, leitungsgebundener oder drahtloser Kommunikationsnetze zum Zwecke der Führung und Überwachung von Energieverteilnetzen bietet keine besonderen technischen Probleme, sondern scheitert höchstens an der heute (noch) nicht vorhandenen Anschlusskapazität, an den zu hohen Kosten und/oder an den durch das Fernmeldemonopol bedingten Schranken. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich daher auf die Frage, inwiefern das Energieverteilnetz selbst zur Informationsübertragung beigezogen werden könnte. Aus naheliegenden Gründen wäre eine solche Nutzung für die Elektrizitätswirtschaft von ganz besonderer Bedeutung.

Zunächst erfolgt eine Beschreibung des Energieverteilnetzes als Übertragungsmedium, wobei dem Niederspannungsnetz als Verbindungsglied auf der Verbraucherebene weitaus das grösste Gewicht zukommt. Hernach werden die Übertragungsverfahren und Signalaufbereitungsmethoden behandelt, die den ungünstigen Kanaleigenschaften dieses Übertragungsmediums am ehesten angepasst sind. Das folgende Kapitel befasst sich mit den grundlegenden Systemkonzepten für die Ein- und Zweiwegkommunikation. Anschliessend werden Fragen der Nutzung öffentlicher Kommunikationsnetze kurz gestreift und Überlegungen über die zukünftige Entwicklung angestellt.

Datenübertragung auf dem Energieverteilnetz

Kommunikationsmöglichkeiten in den verschiedenen Netzebenen

Beim Energieverteilnetz unterscheidet man drei verschiedene Ebenen: Hochspannungs-, Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz.

Das Hochspannungsnetz ($>100\text{ kV}$) wird schon seit einigen Jahrzehnten zur Informationsübertragung beigezogen. Es handelt sich dabei um die sog. Trägerfrequenzübertragung auf Hochspannungsleitungen (TFH), die vor allem in Fernwirkungssystemen für die Netzsteuerung und für den Leitungsschutz, aber auch zur Sprachübertragung eingesetzt wird [1]. Durch geeignete Einspeisung eines modulierten Hochfrequenzträgers im Bereich zwischen Langwellen und Mittelwellen resultiert entlang den Strängen einer Hochspannungsfreileitung eine geführte Wellenausbreitung, die mit relativ geringer Dämpfung behaftet ist. Heute erfolgt aber in zunehmendem Masse der Einsatz von Glasfasern, die bei Freileitungen im Erdseil oder bei Hochspannungskabeln in diesen selbst integriert werden. Damit steht natürlich auch eine fast unbegrenzte Übertragungskapazität zur Verfügung.

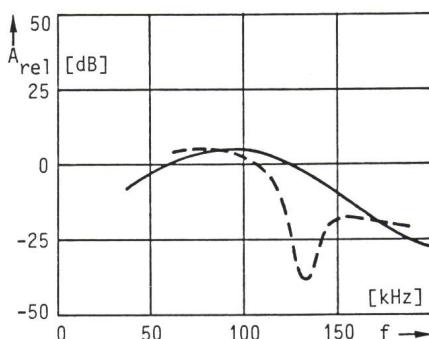
Das Mittelspannungsnetz (10...20 kV) wäre diejenige Ebene, auf der zweckmässigerweise, in Verbindung mit dem Niederspannungsnetz, die Zweiwegkommunikation mit einer grösseren Verbrauchergruppe bewerkstelligt werden könnte. Als grösstes Hindernis erweist sich dabei allerdings der Transformator zwischen dem Mittelspannungs- und Niederspannungsnetz. Er kann näherungsweise als Tief-

pass betrachtet werden, der ab etwa 20 kHz eine so hohe Sperrdämpfung aufweist, dass keine Übertragung mehr möglich ist. Mittels besonderer Überbrückungsglieder wäre zwar eine Verschiebung der Grenzfrequenz nach wesentlich höheren Werten möglich, eine solche Lösung erfreut sich aber aus Kosten- und Sicherheitsgründen keiner grossen Beliebtheit. Berücksichtigt man ferner die lastabhängigen und damit zeitvarianten Frequenzcharakteristiken des Mittel- und Niederspannungsnetzes sowie den vor allem durch Oberwellen bedingten hohen Störpegel, so kommt man leicht zur Einsicht, dass die individuelle Zweiwegkommunikation zwischen einer Zentrale im Mittelspannungsnetz und den unzähligen Verbrauchern im Niederspannungsnetz kaum zu einer brauchbaren Datenrate führt. In der Tat existieren heute vorwiegend Einwegkommunikationssysteme in Form der bekannten Rundsteuerungen [2], die von der Mittelspannungsebene aus zwar nicht die einzelnen Kleinverbraucher, aber wenigstens verschiedene Verbrauchergruppen steuern. Hierzu werden im Bereich von einigen 100 Hz bis höchstens wenigen Kilohertz Schwingungspakete mit grosser Leistung (bis 10 kW und mehr) in das Mittelspannungsnetz eingespeist, die dann nach dem Niederspannungstransformator noch mit genügender Stärke beim Verbraucher eintreffen. Die so erzielten Informationsflüsse sind gering und betragen nur wenige Bit pro Sekunde.

Die Zweiwegkommunikation mit angemessener Datenrate zwischen einem Kontrollzentrum auf der Sekundärseite des Niederspannungstransformators und den daran angeschlossenen Verbrauchern scheint am ehesten aussichtsreich zu sein [3; 4; 5]. Dieser Eindruck folgt auch aus dem Umstand, dass das Technische Komitee TC 105A der Cenelec daran ist, eine Norm für die Datenübertragung auf dem Niederspannungsverteilnetz auszuarbeiten [6].

Die Eigenschaften des Niederspannungsnetzes als Übertragungsmedium

Grundsätzlich kann das Niederspannungsnetz im Frequenzbereich oberhalb 100 Hz bis etwa 150 kHz für die Nachrichtenübertragung genutzt werden. Die obere Grenze ergibt sich aus der Forderung, Interferenzen mit dem Hochfrequenz-Telefonrund-



Figur 1 Typischer relativer Amplitudengang A_{rel} des Niederspannungsnetzes

Gestrichelte Kurve: Durch Fehlanpassung verursachter selektiver Kanaleinbruch

spruch im Langwellenbereich (160 kHz) zu vermeiden. Das Band unterhalb 30 kHz ist durch einen stark anwachsenden Störpegel gekennzeichnet, der durch Oberwellen der Niederspannung sowie durch Rundsteuerungssignale und deren Oberwellen verursacht wird. Man beachte, dass die eingespeisten Nachrichtensignale in dem heute für private Übertragungsdienste freigegebenen Band zwischen 30 kHz und 150 kHz eine Leistung von 5 mW nicht übersteigen dürfen [7].

Die neue Regelung gemäss Cenelec-Norm [6] (wobei noch offen ist, wann diese in Kraft tritt) sieht eine Frequenzzuteilung auf dem Niederspannungsnetz für verschiedene Dienste vor:

3 kHz...95 kHz: Dienste öffentlicher und speziell berechtigter Institutionen (inkl. EWs). Der Bereich 3 kHz...9 kHz ist auch für den privaten Gebrauch zugelassen, wobei aber dort die max. Sendeleistung nur etwa 0.5 mW betragen darf

95 kHz...125 kHz: Freigegeben für die Datenübertragung, Sendeleistungen weniger als etwa 200 mW

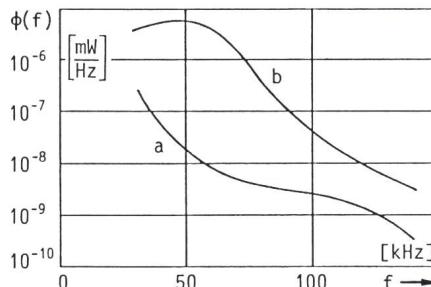
125 kHz...140 kHz: Freigegeben für die unterbrechende Übertragung von Daten (Sendedauer < 1 s, Pause \geq 125 ms, Carrier Sensing auf 132.5 kHz), max. zulässige Sendeleistung noch nicht festgelegt

140 kHz...148.5 kHz: Reserviert für Alarm- und Sicherheitsdienste

Die Signalübertragungseigenschaften des Niederspannungsnetzes sind ausgesprochen schlecht. Die Frequenzgänge verändern sich zeitlich je nach Zu- und Abschaltung von Verbrauchern. Durch fehlangepasste Lastimpedanzen entstehen zudem Reflexionen, die zu selektiven Einbrüchen

im Amplitudengang führen. Moderne elektronische Apparate wie z.B. Informatikgeräte sowie thyristorgesteuerte Verbraucher erzeugen Störspektren mit ausgeprägtem Linienspektrum (Oberwellen), die vor allem in einer industriellen Umgebung sehr hohe Pegel annehmen können. Erwartungsgemäß erleidet auch die Übertragung zwischen Sendern und Empfängern, die an verschiedenen Phasen des Niederspannungsnetzes angeschlossen sind, eine merkliche Zusatzdämpfung. Es ist ferner einleuchtend, dass das Niederspannungsnetz bei tiefen Frequenzen zwischen einigen hundert Hertz und einigen Kilohertz geringere Dämpfungskonstanten aufweist als im Hochfrequenzbereich (>30 kHz). Die Hersteller von Rundsteuerungen befassen sich daher in neuerer Zeit vermehrt mit der Entwicklung von Zweidwegkommunikationssystemen im erwähnten Niederfrequenzbereich, die aber nur einen geringen Datenfluss von höchstens einigen zehn Baud erlauben [5].

Am Institut für Kommunikationstechnik der ETH Zürich war man vor allem an dem heute für private Übertragungsdienste freigegebenen Band zwischen 30 kHz und 150 kHz interessiert. Im Rahmen eines Forschungsprojektes mit verschiedenen Industriepartnern wurden zahlreiche Messungen des Amplitudenganges, der Gruppenlaufzeit und der Störleistungsspektren sowohl in Wohnhäusern als auch in Geschäfts- und Industriegebäuden durchgeführt [8]. Die Figur 1 zeigt den typischen Verlauf des relativen Amplitudenganges eines Übertragungskanals auf dem Niederspannungsnetz. Die Bezugsdämpfung hängt stark von der Länge des Übertragungsweges sowie von der speziellen Lage des Sender- und Empfängeranschlusses in bezug auf die drei Phasen ab und variiert



Figur 3 Störleistungsdichtespektrum $\Phi(f)$ im Niederspannungsnetz

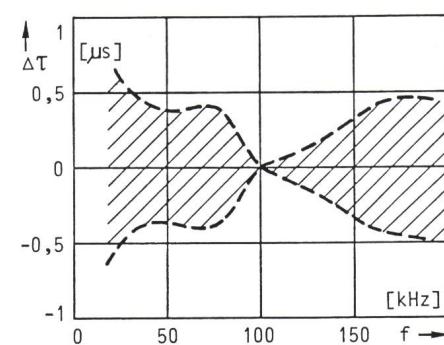
a Wohnhäuser
b Industrielle Umgebung

zwischen 10 und 45 dB. Obwohl der Amplitudengang im allgemeinen ziemlich glatt verläuft und ab 100 kHz monoton abfällt, können tiefe Einbrüche bis zu 30 dB auftreten, die vor allem durch grosse kapazitive Lasten verursacht werden.

Die Messung der Gruppenlaufzeitabweichungen, bezogen auf die mittlere Gruppenlaufzeit eines bestimmten Übertragungsweges bei 100 kHz, ergibt starke Schwankungen. In Figur 2 ist deshalb nur der Bereich dieser Schwankungen schraffiert eingetragen. Man erkennt, dass dabei die Grenzen von $\pm 0.5 \mu\text{s}$ im nutzbaren Übertragungsbereich kaum überschritten werden.

Schliesslich wurde auch das Störleistungsdichtespektrum des Niederspannungsnetzes im Bereich von 30 bis 150 kHz untersucht. Wie bereits früher erwähnt, handelt es sich genau besehen um die Superposition eines ausgeprägten Linienspektrums und eines kontinuierlichen Dichtespektrums. Um einigermassen aussagekräftige Mittelwerte zu erhalten, wurden die Störspektren mit einer relativ groben Auflösung (>1 kHz) analysiert. Die Figur 3 zeigt die auf diese Weise erhaltenen Ergebnisse, wobei der Unterschied zwischen einer Wohn- und Industrienumgebung deutlich hervorgeht. Es muss daher nochmals darauf hingewiesen werden, dass in Wirklichkeit starke selektive Störspannungen in das Übertragungsbild fallen können, deren Frequenzen oberhalb 30 kHz häufig bei Vielfachen von 10 kHz, 12 kHz, 15.6 kHz und 25 kHz liegen (Informatikgeräte, Fernsehapparate).

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass die Einspeisung und Abzapfung der Informationssignale mit Koppelgliedern erfolgen muss, die eine hinreichende Sicherheit garantieren und daher relativ teuer sind.



Figur 2 Variationsbereich der Gruppenlaufzeitabweichung $\Delta\tau$ des Niederspannungsnetzes

Signalübertragungsverfahren im Niederspannungsnetz

Nachdem im vorangehenden Abschnitt die ungünstigen Übertragungseigenschaften des Niederspannungsnetzes aufgezeigt wurden, stellt sich nunmehr die Frage, wie dennoch ein leistungsfähiger und zuverlässiger Informationstransport erreicht werden kann und welche Grenzen zu erwarten sind.

Als wesentliche Leistungsmerkmale der Datenübertragung lassen sich folgende Begriffe einführen:

- Informationsfluss R [bit/s]
- Fehlerwahrscheinlichkeit P [%]
- Verfügbarkeit V [%]

Sieht man von der Verfügbarkeit V ab, von der später noch die Rede sein wird, so ist die Leistungsfähigkeit des Übertragungssystems durch die Kanalkapazität C [bit/s] gegeben. Sie beschreibt den maximalen Informationsfluss, den das System ohne Fehler bewältigen kann, und hängt in erster Linie von der Kanalbandbreite B (Hz), der Signalleistung S [W] und der Störleistung N [W] ab. Eine sichere Datenübertragung ist offenbar dann gewährleistet, wenn die Ungleichung

$$R \leq C(B, S, N) \quad (1)$$

gilt. Die Kanalkapazität eines praktischen Übertragungssystems kann nicht exakt berechnet werden. Unter idealisierten Annahmen lässt sich aber die bekannte Beziehung

$$C = B \cdot 1d(1 + S/N) \quad (2)$$

herleiten [9], aus der wenigstens die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen der Kanalkapazität C und den Parametern B , S und N ersichtlich sind.

In der Praxis hat man natürlich nie eine verschwindende Fehlerwahrscheinlichkeit P , sondern letztere stellt eine Funktion des verwendeten Übertragungsverfahrens sowie insbesondere des Störabstandes S/N dar. Problematisch ist natürlich auch der Begriff der Bandbreite B , wenn die Frequenzcharakteristik gemäß den Ausführungen im letzten Abschnitt zeitvariant ist. Immerhin kann aus Gleichung (2) der qualitative Schluss gezogen werden, dass B und S/N bei vorgegebener Kanalkapazität C austauschbar sind und dass für eine bestimmte maximal zulässige, mittlere Fehlerwahrscheinlichkeit P durch die Vergrößerung der

Bandbreite B eine Erhöhung des Informationsflusses R resultiert.

Die schlechten Übertragungseigenschaften des Niederspannungsnetzes legen es nahe, von der erwähnten Bandbreitevergrößerung Gebrauch zu machen und folgende Verfahren anzuwenden:

- Breitbandmodulation
- Bandspreiztechnik (Spread Spectrum)
- Multiträgerfrequenztechnik (Frequency Diversity)
- Zeitlich gestaffelte Mehrfachübertragung (Time Diversity)
- Kanalcodierung

Eine Kombination ist selbstverständlich ebenfalls möglich.

Als *Breitbandmodulationsverfahren* fallen die analoge bzw. digitale Phasen- und Frequenzmodulation (PM, FM bzw. PSK, FSK) in Betracht. Entsprechende Systeme sind auf dem Markt erhältlich (Gegensprechanlagen, Babyphon, Fernwirksysteme). Ihre Schwäche besteht darin, dass sie auf selektive Einbrüche im Amplitudengang und insbesondere auf störende Oberwellen relativ empfindlich reagieren.

Bessere Resultate verspricht die Anwendung der *Bandspreiztechnik* [10], die bezüglich Störspektren mit Liniencharakter und selektiven Dämfungsspitzen besser angepasst ist. Die beiden grundlegenden Verfahren, nämlich die Frequenzhüpferfrequenz (Frequency Hopping, FH) und die Phasenhüpferfrequenz (Phase Hopping, PH; Direct Sequence Spread Spectrum; Pseudo Noise Spread Spectrum) erreichen dabei die Immunität auf verschiedene Art und Weise. Während die bei FH in einem gegebenen Frequenzraster pseudozufällig hin und her hüpfende Trägerfrequenz immer auf eine ausreichende Zahl von Frequenzintervallen der Kanalcharakteristik fällt, wo keine Störkomponenten und keine Dämfungsspitzen vorhanden sind und damit die ungehinderte Übertragung gewährleistet ist, wird bei PH das Informationssignal über die gesamte Kanalbandbreite «verschmiert»; die Lücken zwischen den Störkomponenten sowie die Amplitudengangpartien mit glattem Verlauf garantieren aber den Empfang eines ausreichenden Nutzsignalanteils. Sowohl Versuchssysteme mit FH [11;12] als auch solche mit PH [3; 4] sind untersucht worden oder stehen in Erprobung.

Die *Multiträgerfrequenztechnik* lehnt sich eng an das Prinzip der Fre-

quenzhüpferfrequenz an, indem gleichzeitig verschiedene Träger in einem über den Kanal verteilten Frequenzraster dasselbe Signal übertragen und damit die Wahrscheinlichkeit gross ist, dass mehrere Trägersignale oder wenigstens ein Trägersignal ungestört empfangen werden kann. Auch nach diesem Prinzip sind Lösungsansätze bekannt [13]. Eine weitere Variante der Multiträgerfrequenztechnik wäre ein System mit automatischer Kanalwahl, ein Prinzip, das aus der Funktechnik bekannt ist [14]. Der Kanal wird in Teilkanäle unterteilt. Sender und Empfänger überwachen dauernd den Zustand der Teilkanäle. Soll nun eine Verbindung aufgebaut werden, einigt man sich iterativ auf einen freien, ungestörten und mit geringer Dämpfung behafteten Kanal.

Zeitlich gestaffelte *Mehrfachübertragung* käme grundsätzlich ebenfalls als Übertragungsverfahren in Betracht und würde eine Signalbandbreitevergrößerung bewirken, weil dieselbe Nachricht mehrmals pro Zeiteinheit gesendet werden muss. Da im Niederspannungsnetz jedoch nur relativ langsame Veränderungen der Störverhältnisse und Frequenzcharakteristik zu erwarten sind, scheidet diese Methode aus.

Schliesslich bleibt noch die *Kanalcodierung* zu erwähnen. Bekanntlich lassen sich durch Einfügen von redundanten Bit in eine Datenimpulsfolge auf der Empfangsseite die Übertragungsfehler erkennen und korrigieren [15]. Diese Massnahme bedeutet natürlich bei vorgegebenem Informationsfluss ebenfalls eine Erhöhung der Übertragungsbandbreite. Man beachte aber, dass eine solche fehlererkennende oder fehlerkorrigierende Codierung nur dann mit annehmbarem Aufwand möglich ist, wenn die Fehlerwahrscheinlichkeit auch ohne Codierung genügend kleine Werte annimmt (z.B. $P < 1\%$). Deshalb erweist sich auf dem Niederspannungsnetz die Kombination eines der vorangehend beschriebenen Breitbandübertragungsverfahren mit der Kanalcodierung am aussichtsreichsten.

Als Anhaltspunkt für die effektive Kanalkapazität des Niederspannungsnetzes mag die Aussage dienen, dass mit dem in [3] beschriebenen PH-System in einer nicht industriellen Umgebung eine Bitrate von 1200 bit/s mit einer Bitfehlerwahrscheinlichkeit von 10^{-4} bis 10^{-3} erreicht wurde. Die eingespeiste Sendeleistung betrug dabei weniger als 5 mW. Bei optimaler Ausle-

gung eines Breitband-Datenübertragungssystems mit Kanalcodierung dürften unter Einhaltung der erwähnten Randbedingungen Datenraten bis zu einigen Kilobit pro Sekunde möglich sein. Der Abhandlung [9] ist ferner zu entnehmen, dass bei der Datenkommunikation mittels FH zwischen der Niederspannungs- und Mittelspannungsebene (mit Überbrückung des Niederspannungstransformators) trotz erheblich höherer Sendeleistung bis etwa 500 mW nur noch Bitraten von etwa 300 bit/s erreicht werden können. Bei einer Verfügbarkeit von 95% beträgt dabei die Reichweite 500 bis 700 m.

Kommunikationskonzepte

Einwegkommunikation

Bei der Einwegkommunikation geht es darum, die *Steuerung* von Energieverteilnetzen sicherzustellen, d.h. es müssen Leitungen, Verbrauchergruppen oder einzelne Verbraucher eingeschaltet werden. Soll diese Steuerung von einem Zentrum aus online, d.h. unverzüglich erfolgen (Direct Control), so ist neben der sicheren Übertragung auch eine hohe Verfügbarkeit notwendig. Letzterer Begriff muss so interpretiert werden, dass trotz einer im allgemeinen sicheren Übertragung doch hin und wieder extrem ungünstige Verhältnisse auftreten können, die eine Kommunikation über mehr oder weniger lange Zeitdauer verunmöglichen.

Wenn die Verfügbarkeit den Wert 100% merklich unterschreitet, besteht die Möglichkeit, jedem Verbraucher eine eigene Intelligenz zuzuordnen (Distributed Control). Es genügt dann, wenn die aktuellen Daten nur von Zeit zu Zeit an den Verbraucher übertragen werden. Natürlich erlaubt eine solche Informationsübertragung, zusammen mit einer lokalen speicherprogrammierten Steuerung, nur eine suboptimale Lastmanagement.

Für die Einwegkommunikation kommen alle weiter vorne aufgezählten Übertragungsmedien in Frage. Unter der Voraussetzung, dass nur Leitungen und wenige Verbraucherguppen gesteuert werden sollen, sind Informationsflüsse von wenigen Bit pro Sekunde ausreichend. Neben den bekannten Rundsteuerungen auf dem Energieverteilnetz lässt sich dann auch eine extrem schmalbandige Funkverbindung oder eine «Huckepack»-

Übertragung mittels Rundfunk- und Fernsehsignalen verwenden. Die in grosser Zahl erforderlichen Empfänger können sehr einfach und somit billig realisiert werden, während die wenigen Sender leistungskraft und aufwendig sind. Die Verfügbarkeit einer solchen Datenübertragung ist zumeist nahezu 100%.

Zweiwegkommunikation

Eine Zweiwegkommunikation wird dann erforderlich, wenn neben der Steuerung eine *Überwachung* der Leitungen und Verbraucher bzw. eine Rückmeldung über den Schaltzustand und die aktuelle Leistungsaufnahme sowie allenfalls die Ablesung des Energiekonsums erfolgen soll. Dabei benötigt man einen Vorwärtspfad für die Verbindung vom Kontrollzentrum zu den Verbrauchern und einen Rückwärtspfad von den Verbrauchern zum Zentrum. Die Vorwärts- und Rückwärtskommunikation kann auf ein und demselben Übertragungskanal oder auf verschiedenen Pfaden erfolgen, wobei wiederum das Prinzip der unverzüglichen und gelegentlichen Verbindung ohne und mit Intelligenz beim Verbraucher auf den beiden Pfaden denkbar ist.

Soll nun wirklich mit jedem Verbraucher Zweiwegkommunikation betrieben werden, so ergeben sich offensichtlich Informationsflüsse von einigen Kilobit pro Sekunde und mehr, die vor allem im Rückwärtspfad, aber auch im Vorwärtspfad bewältigt werden müssen. Aufgrund der Ausführungen im Abschnitt über die Signalübertragung im Niederspannungsnetz kann damit das Energieverteilnetz nur noch auf der Niederspannungsebene verwendet werden. Drahtlose Übertragungswege bis zum einzelnen Verbraucher entfallen aus Gründen der elektromagnetischen Verträglichkeit sowie zufolge der Komplexität des individuellen Sende-/Empfangssystems. Ge-wisse Möglichkeiten, eine Zweiwegkommunikation vom Verbraucher bis auf die Mittelspannungsebene voranzutreiben, zeichnet sich ab, wenn nur eine gelegentliche Verbindung in Kauf genommen wird [16]. Im übrigen scheint aber heute – wie bereits einleitend erwähnt – die Zweiweg-Breitbandkommunikation auf dem Niederspannungsnetz mit anschliessendem Übergang auf ein leistungsfähiges Datenübertragungsnetz (Telefonnetz, LAN usw.) am ehesten erfolgversprechend zu sein [4].

Nutzung öffentlicher Kommunikationsnetze

Die offenkundig ungenügende Übertragungskapazität des Energieverteilnetzes sowie die beschränkten Möglichkeiten des Einsatzes drahtloser Kommunikationsmittel für die optimale Steuerung und Überwachung des elektrischen Energiekonsums legt die Frage nahe, ob der hierzu erforderliche umfangreiche bidirektionale Informationstransport in naher oder ferner Zukunft nicht auf öffentlichen Kommunikationsnetzen erfolgen sollte und zwar von einem regionalen Kontrollzentrum aus direkt bis zum einzelnen Verbraucher.

Solche Überlegungen sind keinesfalls unrealistisch, da im Rahmen des Ausbaus eines flächendeckenden, dienstintegrierten digitalen Netzwerkes (ISDN) schlussendlich praktisch in jedem Raum eines Wohnhauses oder Gebäudes eine Informationssteckdose geplant ist, analog zur heute bereits vorhandenen Steckdose für die Stromversorgung. Der geringe Abstand zwischen Verbraucher und Anschluss zu einem leistungsfähigen und sicheren Kommunikationsnetz macht die Anwendung des letzteren zu Steuer- und Überwachungszwecken sehr attraktiv. Vor allem mit dem Übergang auf das Breitband-ISDN (BISDN), das auf einem Glasfasernetz bis zum Teilnehmer basieren wird, steht eine derart grosse Übertragungskapazität zur Verfügung, dass allein schon aus Kostengründen der Betrieb separater Datenkommunikationsanlagen kaum mehr konkurrenzfähig wäre. Bis zu Beginn des dritten Jahrtausends ist ein massiver Zerfall der Übertragungstaxe pro Informationsbit zu erwarten; für den Schritt von ISDN auf BISDN werden Reduktionsfaktoren in der Größenordnung von 100 oder sogar 1000 genannt. Dank der neuen Fernmeldegesetzgebung bietet sich der Elektrizitätswirtschaft zudem die Möglichkeit an, auf diesen Universalnetzen eigene Kommunikationsdienste einzurichten.

Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, eine Übersicht über die Kommunikationsmöglichkeiten zum Zwecke der Führung und Überwachung von elektrischen Energieverteilnetzen zu geben. Dabei hat sich gezeigt, dass der Schritt von der Einweg-

kommunikation zwischen Kontrollzentrum und Verbraucher zur Zweiwegkommunikation grosse Schwierigkeiten bereitet. Während vor allem mit Rundsteuerungen auf dem Energienetz selbst dank hoher Sendeleistung ein zwar nur geringer, aber zuverlässiger Informationsfluss erzielt werden kann, lässt sich der Rücktransport einer Vielzahl individueller Verbraucherdaten auf allen heute zur Verfügung stehenden Medien kaum unter annehmbaren Bedingungen durchführen. Insbesondere stellt das Energieverteilnetz einen derart schlechten Übertragungskanal dar, dass grössere Bitraten bei den geforderten tiefen Sendeleistungspegeln gar nicht möglich sind. Diese Situation kommt nicht von ungefähr, denn ein Netz, das für die Energieübertragung konzipiert ist, wird sich kaum für die Nachrichtenübertragung eignen. Beschränkt man sich nur auf die Zweiwegkommunikation im Niederspannungsnetz, so scheint es unter Bezug geeigneter Modulations-, Codierungs- und «Diversity»-Verfahren möglich zu sein, eine Datenübertragung bis zu wenigen Kilobit pro Sekunde sicherzustellen.

Mit grösster Wahrscheinlichkeit darf angenommen werden, dass längerfristig die öffentlichen Kommunikationsnetze wie ISDN und Breitband-ISDN für die Steuerung und

Überwachung der Energieverteilnetze Verwendung finden. Diese Universalnetze garantieren eine sichere Übertragung mit hoher Verfügbarkeit und weisen dank des Einsatzes von Lichtwellenleitern eine besonders gute Wirtschaftlichkeit auf. Die Neuentwicklung spezieller Systeme für die Zweiweg-Datenkommunikation auf dem Energieverteilnetz oder auf drahtlosem Wege zum Zwecke eines optimalen Lastmanagements und/oder zur Zählerfernablesung dürfte also nur im Sinne einer Übergangslösung geachtet sein.

Literatur

- [1] G. Dressler und H.-K. Podszek: Hochfrequenz-Nachrichtentechnik für Elektrizitätswerke. 2. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1952.
- [2] R. Kniel: 40 Jahre Rundsteuerung bei Zellweger Uster AG. Uster, Zellweger AG, 1986.
- [3] T. Dvorák and H. Ochsner: Low tension power line as a fast digital data transmission channel. Proceedings of the 4th Symposium on Electromagnetic Compatibility. Zürich, March 10...12, 1981; paper 1A1, p. 1...6.
- [4] W. Waring a. o.: Energy management in the United Kingdom. Cired - report f04, 1987.
- [5] H. P. Bär: A new communication system for electric utilities system; description and field test results. Cired - report f18, 1987.
- [6] Datenübermittlung auf elektrischen Niederspannungs-Verteilnetzen. prEN 50 065, Teil 1, März 1989.
- [7a] Technische Richtlinie der TF-Funkanlagen mit einer Nutzleistung von maximal 5 mW und einer DBP-Zulassungsnummer der Kennbuchstabreihe «TWF...». FTZ-Richtlinie 17R 2040. Darmstadt, Fernmeldetechnisches Zentralamt, 1985.
- [7b] Richtlinie für die technische Prüfung von TF-Industriefunkanlagen auf Niederspannungsleitungen (bis 380 V). FTZ-Richtlinie 446F 2022. Darmstadt, Fernmeldetechnisches Zentralamt, 1974.
- [8] P. E. Leuthold: Application of spread spectrum techniques to inhouse communication systems. Symposium Digest of the third Kobe International Symposium on Electronics and Information Sciences, Kobe, 1984; paper 41.1...12.
- [9] C. E. Shannon: Communication in the presence of noise. Proc. IRE 37(1940)1, p. 10...21.
- [10] H. Ochsner: Bandspreiztechnik. Bull. SEV/VSE 77(1988)3, S. 119...125.
- [11] K. Dostert: Störsichere Messdatenübertragung auf Stromversorgungsnetzen. Technisches Messen 55(1988)7/8, S. 290...295.
- [12] W. R. Braun: Robcom: Ein neues Konzept für die Datenübertragung über das elektrische Verteilnetz. Bull. SEV/VSE 79(1988)13, S. 730...739.
- [13] A. A. Schieli: Schnelle Parallel-Datenübertragung mit zeitbegrenzten Impulsen. Philips Research Report, Supplements -(1973)4, p. 1...133.
- [14] Tamina, das moderne taktische Funksystem. Die schweizerische Lösung. Technik und Einsatz. Zürich, Arbeitsgemeinschaft ABZ (Autophon, BBC, Zellweger), 1986.
- [15] P. S. K. Wah and T. Siegenthaler: Practical transform techniques for error and erasure correction. Electronics Letters 18(11 1982)10, p. 432...434.
- [16] T. Schaub: Zweiweg-Kommunikation im elektrischen Verteilnetz; Erfahrungen und Grenzen. Bull. SEV/VSE 80(1989)13, S. 773...778.