Unerwünschte Komponenten im Starkstromnetz

Autor(en): **Zaruski, Peter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 41

PDF erstellt am: **23.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75545

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

dern über Anschlussgebühren und Wärmetarif von den Bezügern aufgebracht werden. Die Anschlussgebühr variiert je nach Anschlussleistung und beträgt z.B. für 1 EFH (neu) mit 30 KW Anschlusswert etwa Fr. 8000.– bzw. Fr. 5000.– für eine Altbaute. Der jährliche Grundpreis wird ebenfalls gestaffelt und beträgt für den gleichen Anschlusswert etwa Fr. 1600.–. Der Wärmebezugspreis soll 5 Rp. per Kilowattstunde Nutzwärme, gemessen am Wärmezähler, betragen und für die nächsten sechs Jahre fest sein.

Finanzierung

Für den Bau und Betrieb des Fernwärmenetzes erfolgte 1983 die Gründung einer Aktiengesellschaft mit einer Beteiligung der Gemeinden in der Höhe von 51 Prozent, das übrige Aktienkapital wird von den Förderern (NOK, BBC usw.) aufgebracht.

Um den Gemeinden die Möglichkeit zu geben, ihre Ortsnetze als selbständiges Gemeindewerk zu betreiben und überall die Endabnehmer nach dem gleichen Tarif beliefern zu können, richtet die Refuna AG an die Gemeinden einen einmaligen Baubeitrag aus.

Die NOK haben sich gegenüber der Refuna AG zur Senkung der Kosten erfreulicherweise zu folgenden Leistungen verpflichtet:

☐ Die NOK übernehmen die Kosten der Wärmeauskopplung und der Rohrleitungen auf der Insel Beznau samt Leitungsbrücke über den Oberwasserkanal in der Höhe von etwa Fr. 9 Mio.
☐ Die NOK stunden die Kosten der Leitung bis zum EIR.
☐ Der von der Refuna an die NOK zu zahlende Wärmepreis verrechnet sich nach Massgabe der im Kernkraftwerk ausgefallenen Stromerzeugung. Dieser Preis entspricht demjenigen, den die NOK den Kantonswerken verrechnet.
☐ Der Wärmepreis ist bis 1990 fest.
☐ Die NOK gewähren auf den Wärmepreis im 1. Jahr einen Rabatt von 50 Prozent, der innert sechs Jahren auf Null abgebaut wird.

Die Gemeinden haben inzwischen die erforderlichen Baukredite beschlossen. Die Arbeiten wurden auf dem Submissionsweg losweise vergeben. Auf Herbst 1984 können bereits die ersten Bezüger mit Fernwärme versorgt werden.

Literatur

Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, Baden/Sulzer Energieconsulting AG, Winterthur: Techn. Bericht und Kostenvoranschlag Okt. 1982

K. Handl, dipl. Ing., Techn. Projektleiter Refuna: Das Projekt Refuna – eine reg. Fernwärmeversorgung

ARGE Ingenieure SIA R. Walter, Brugg/Gruneko AG., Stein AG, Ortsnetz Villigen. Techn. Bericht Sept. 1983; Ortsnetz Würenlingen. Techn. Bericht Mai 1983

Ausblick

Das untere Aaretal weist alle äusseren, infrastrukturellen Voraussetzungen für die Verwirklichung eines regionalen Fernwärmenetzes auf. Schon heute werden die beiden eidg. Institute problemlos mit Refunawärme beheizt. Der weitere Ausbau soll zügig vorangetrieben werden.

Mit dem Projekt Refuna wird an einem konkreten Beispiel aufgezeigt, wie Erdöl entscheidend substituiert, mit Fernwärme eine Region zu günstigen Konditionen versorgt und ein entscheidender Beitrag zum Umweltschutz geleistet werden kann.

Adresse des Verfassers: *R. Walter,* dipl. Ing. ETH/SIA/ASIC, Ing.-Büro für allg. Tiefbau + Vermessung, 5200 Brugg.

Unerwünschte Komponenten im Starkstromnetz

Von Peter Zaruski, Zürich

Elektrizität ist die sauberste Energieform, die wir kennen. Ihre selbstverständliche Anwendung im täglichen Leben lässt vergessen, dass auch bei der Elektrizität Probleme der Reinhaltung bestehen. Störende Abweichungen im Starkstromnetz, wie Spannungsschwankungen, Impulse und Verzerrungen der Spannungskurve, können die Funktion von Geräten empfindlich beeinträchtigen. Betroffen sind vor allem Steuerungen, Messgeräte und Datenverarbeitungsanlagen. Die Störungsursachen sind oft schwer festzustellen und verlangen die Anwendung geeigneter Messinstrumente und Analysemethoden.

Erwartungen des Anwenders

Die Elektrizität ist bei fast allen Anwendungen ein Hilfsmedium. Als universelle, umweltgerechte Energieform wird sie in allen Bereichen menschlicher Tätigkeiten in grossem Massstab und mit ausgezeichnetem Wirkungsgrad verwendet. Indessen ist sie praktisch nirgends die Hauptfunktion eines Apparats oder einer Maschine; sie ermöglicht sie nur. Die Störfreiheit der Geräte und der weitgehend gefahrlose Umgang mit der Elektrizität haben im Laufe der Jahrzehnte gewisse Mindestforderungen an die Qualität elektrischer Grössen weniger wichtig erscheinen lassen. Dementsprechend wird vom Anwender als selbstverständlich vorausgesetzt, die verfügbare elektrische Spannung sei rein: Bei Wechselstrom habe sie die bekannte ideale Sinusform, und bei Gleichstrom sei sie so rein wie die Spannung einer Batterie.

Die Realität

In Wirklichkeit entspricht die angebotene Spannung nicht ganz dem erwarteten Ideal. Allerlei unerwünschte Komponenten im Starkstromnetz erschweren gelegentlich den fehlerfreien Betrieb der angeschlossenen Geräte. Seit etwa 20 Jahren zeichnen sich zwei gegenläufige Entwicklungen ab, die den sich mit Starkstrom befassenden Fachleuten bisweilen zu schaffen machen. Mit der zunehmenden Verwendung von Geräten der Leistungselektronik tritt eine Klasse von Verbrauchern in Erscheinung, die neben unbestrittenen Vorzügen auch unerwünschte Nachteile hat: Sie wirkt störend in das Starkstromnetz zurück. Etwa gleichzeitig hält die Mikroelektronik in zahllosen Gebieten einen triumphalen Einzug und läutet ein ganz neues Zeitalter ein. Aus mancherlei Gründen sind die Ge-

räte der Mikroelektronik jedoch besonders empfindlich gegen Störungen elektrischer Natur, auch gegenüber denjenigen, die aus dem speisenden Elektrizitätsnetz stammen.

Damit ist ein anschauliches Szenario von Störquelle - Übertragungsweg (Koppelung) - Störopfer gegeben.

Abweichungen vom Ideal

Folgende Abweichungen vom Ideal sind im allgemeinen Starkstromnetz anzutreffen:

Langsame Schwankungen. Sie treten im Laufe des Tages oder am Wochenende als Folge langsamer Lastschwankungen und Regelvorgänge auf. Sie sind in der Schweiz kein Problem.

Einbrüche und Überspannungen (Sag/Surge). Sie werden verursacht durch abrupte Laständerungen, meist in der Nähe des Störopfers. Aus- und Einschalten von starken Verbrauchern und Schaltmanöver im Netz sind die häufigsten Ursachen. Wenn dadurch Spannungsänderungen von mehr als 10 Prozent der Netzspannung entstehen, macht sich das Phänomen bemerkbar. Störungen sind möglich, Zerstörungen treten im allgemeinen nicht auf.

Spitzen und Impulse (Spikes). Sie haben Ursachen wie Abschaltung von Induktivitäten, Durchbrennen von Sicherungen, Kurzschlüsse, Blitzschlag, Schaltfunken und Kommutationserscheinungen. Allen diesen Erscheinungen ist gemeinsam, dass sie von sehr kurzer Dauer sind (µs-Bereich) und dass sie erhebliche Spannungswerte zur Folge haben (mehrere hundert Volt im Niederspannungsnetz). Ihr Störpotential hängt neben der Spannung auch vom Energieinhalt des Pulses ab. Mikrounterbrüche sind ähnliche Erscheinungen; bei ihnen bricht die Spannung während wenigen Mikrosekunden auf quasi null zusammen.

Verzerrungen der Spannungskurve. Eine wachsende Zahl von Geräten der Starkstromtechnik hat eigentümliche Spannungs-/Stromkennlinien. Sie sind nicht mehr gerade, sondern gekrümmt, gebrochen oder verlaufen unstetig. Diese Kennlinienart hat zur Folge, dass die Stromkurve nicht mehr ein Abbild der Spannungskurve, sondern verzerrt ist. Selbstverständlich hat das speisende Netz nicht die Impedanz $Z_N = O$, sondern eine messbare Impedanz. An ihr bewirkt der Strom einen Spannungsabfall, verzerrt entsprechend dem Strom. Durch Subtraktion des Spannungsabfalls von der Netzspannung entsteht in der Netzspannung ebenfalls eine Verzerrung, die sich anderen angeschlossenen Geräten mitteilt. Es lässt sich unschwer herleiten, dass die Netzimpedanz, die Anschlussleistung des Störers sowie dessen Stromverzerrung den Betrag der Störung bestimmen. Dieser fundamentale Zusammenhang besteht in übertragenem Sinn auch für die Bilder 1 bis 3.

Fourieranalyse

Fourier stiess Anfang des 19. Jahrhunderts bei der Untersuchung von Wärmeflussproblemen auf eine Gesetzmässigkeit, deren Bedeutung längere Zeit wenig beachtet blieb: die Fourieranalyse. Er wies nach, dass jede beliebige periodische Schwingung der Frequenz f in eine Reihe von Teilschwingungen zerlegt werden kann, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache von f sind und deren Beträge und Phasenwinkel in eindeutiger Beziehung zur Grundschwingung stehen. Die Reihe der Vielfachen von f (Ordnungen ν_n) ist theoretisch endlos, daher die Bezeichnung «Fourierreihe».

Umgekehrt kann aus einer Serie von Teilschwingungen mit Frequenzen, die ein Vielfaches von f sind, die Grundschwingung der Frequenz f rekonstruiert werden, sofern die Beträge und die Phasenlagen der Teilschwingungen bekannt sind. Diese Zusammensetzung wird Fourierintegral genannt. Die Teilschwingungen heissen Harmonische oder Oberschwingungen von f. Sie sind ideale Sinuskurven und vielerlei Berechnungen zugänglich.
Das Ausserordentliche an der Erkenntnis von *Fourier* besteht darin, dass eine beliebig deformierte Wellenerscheinung in ideale Teilschwingungen zerlegt wird. Ihre Pegel und Phasenlagen lassen bei geeigneter Darstellung einen ausgezeichneten Überblick über die Natur der Verzerrung zu. Als geeignete Darstellung bietet sich die Spektralform an.

Die Darstellung der Theorie von *Fourier* ist jedoch kompliziert und bildet ein klassisches Kapitel der höheren Mathematik. Der Brückenschlag zur Elektrotechnik ergibt sich mit der gemeinsamen Verwendung der komplexen Zahlenebene. Das Essentielle liegt in der Transformation einer Zeitfunktion in eine Serie von Frequenzfunktionen und umgekehrt.

Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der angewandten Mathematik *(Cooley* und *Tuckey)* sowie der Numerik bescherten der Technik die «Fast Fourier Transform» (FFT). Dieser Algorithmus kürzt die Fourieranalyse ohne Genauigkeitsverlust ab und ermöglicht eine rechnerische Durchführung mit dem Computer oder mit mathematischen Analysern innerhalb einer annehmbaren Zeitspanne.

Die Fourieranalyse und ihre Aussagen werden hier so ausführlich beschrie-

Bild 1. Spannungskurve im Industrienetz

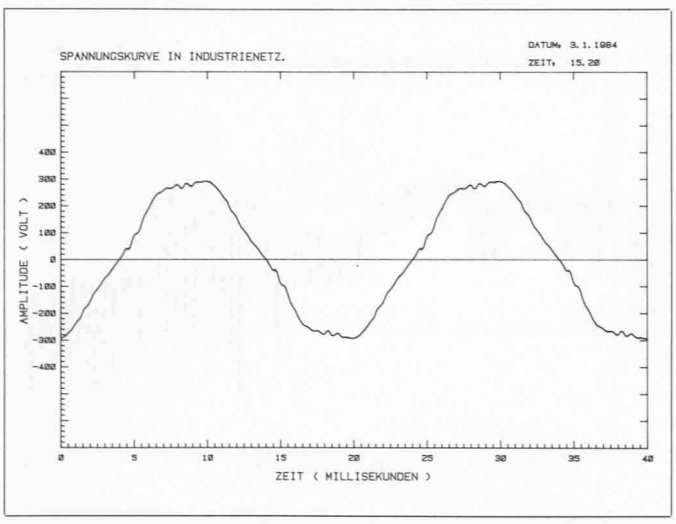
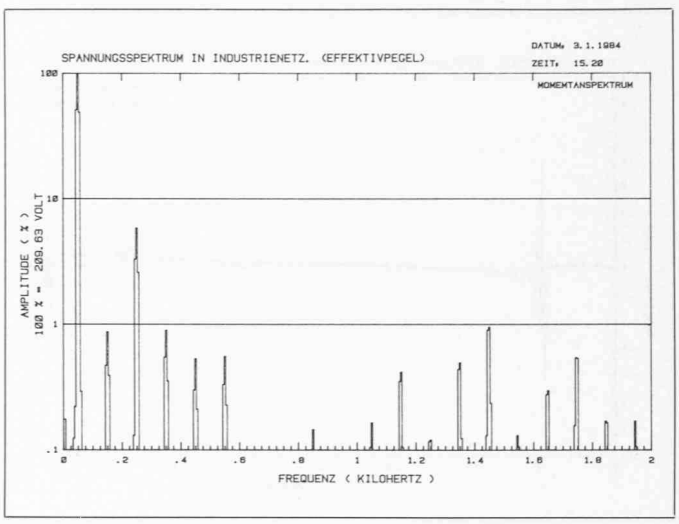


Bild 2. Spannungsspektrum im Industrienetz (Effektivpegel)



ben, da alle Abweichungen von der idealen Kurvenform (Bilder 1 bis 4) mit ihr in messbare Elemente zerlegt werden können. Massnahmen gegen Kurvendeformationen, also gegen unerwünschte Komponenten, werden logischerweise zuerst bei den am meisten störenden Teilkomponenten ergriffen.

Störer – Übertragungsweg – Störopfer

Im folgenden werden die wichtigsten Teilnehmer am Störgeschehen aufgezählt:

Störer	*Störcharakter*
Schweissanlagen	Sag/Surge, Harmonische
Lichtbogenöfen	Sag/Surge, Harmonische
Entladungslampen	Harmonische
Phasenanschnitt-steuerungen	Harmonische (Spikes)
Paketsteuerungen	Harmonische
Gesättigte Induktivitäten	Subharmonische
Gleichrichter	Harmonische
Kopiermaschinen	Spikes, Sag/Surge
Fernseher	Harmonische
Statische Frequenz-umformer	Harmonische
Elektromedizini-sche Geräte	Spikes, Harmonische

Übertragungsweg (Koppelung)	
Freileitung	hohe Längsinduktivität, Blitzrisiko
Kabelleitung	hohe Querkapazität begünstigt tiefere Harmonische
Transformer	hohe Längsinduktivität dämpft höhere Harmonische
	Δ-Schaltung unterdrückt Harmonische der Reihen 3, 6, 9 usw.

Störopfer	
Rundsteuerung	Nicht- oder Fehlfunktion
Fernseher	Bild- und Tonstörungen
Elektronische Steuerungen	Fehlfunktion, Ausfall
Elektroakustik	Tonstörungen
Datenverarbeitung	Fehlbearbeitungen, Datenverlust
Elektromedizin	Funktionsstörungen
Messgeräte	Ausfall, falsche Werte
Alarmanlagen	Fehlalarm, Ausfall

Auffallend ist, dass gewisse Gerätekategorien sowohl Störer als auch Störopfer sind. Es kommt sogar der Fall vor, dass ein Gerät sich unter bestimmten Anschlussverhältnissen selbst stört – dann nämlich, wenn beispielsweise aus Kostengründen bei der Konstruktion eine bestimmte Netzqualität vorausgesetzt wurde, die das Gerät später im Betrieb nicht vorfindet (zu hohe Netzimpedanz).

Jedem Störer ist ein *Störpotential* eigen, das sich an seiner Anschlussleistung und der Verzerrung seiner Stromkurve misst.

Jedem Übertragungsweg (meist Elektrizitätsnetz) ist ein bestimmtes Mass an *Störabsorption* (Immunität) eigen, das proportional der Kurzschlussleistung ist und vom Charakter der Netzimpedanz Z_N abhängt.

Jedes Störopfer schliesslich soll eine bestimmte *Störfestigkeit* haben, die sich an der Verzerrung der Spannungskurve misst, die es gerade noch verträgt. Leider gibt es viele Apparate, deren Störfestigkeit ungenügend ist.

Störungen

Die folgende Auswahl an Vorfällen zeigt die Vielfalt möglicher Störungen:

- In einem Pflegeheim arbeitete der Computer unzuverlässig. Katastrophale Datenverluste führten zu einem ernstlichen Streit mit dem Lieferanten. Ursache: der Kopierapparat nebenan.
- In einem Elektrizitätswerk funktionierte die Rundsteuerung nicht mehr richtig. Die öffentliche Beleuchtung brannte tagsüber, die Boilersperrung versagte, und die Tarifumschaltung geriet durcheinander. Ursache: eine mobile Schweissanlage in einem Stahlbauunternehmen.
- Ein Blitzschlag in die Freileitung eines ländlichen Elektrizitätswerkes schädigte den schon älteren Computer eines Gewerbebetriebs so, dass es zunehmend zu intermittierenden Fehlern kam. Schwerwiegende Datenverluste und Fehlbearbeitungen von Abrechnungen waren die Folge. Nach monatelangen Reparaturen und bedeutendem Personalmehraufwand musste das Gerät unter Preisgabe wichtiger Programme stillgelegt werden.
- In einem Gewerbebetrieb brannten aus unerklärlichem Grund wesentliche Teile eines Computers aus. Totalverlust und behindernde Behelfslösungen bis zur Lieferung einer Ersatzanlage waren das Ergebnis. Grund: nie eindeutig geklärt.
- Auf einer ausgewählten Bahnstrecke wurden mit einem neuartigen Triebfahrzeug Versuche durchgeführt. Allerlei Fernmeldeanlagen längs der Bahnstrecke wurden stark gestört. Grund: Harmonische, die vom Fahrregler des Fahrzeugs herrührten, sowie ungenügende Störfestigkeit der Signalleitungen.

Bild 3. Common Mode Puls (Ereignis zwischen O und Erde)

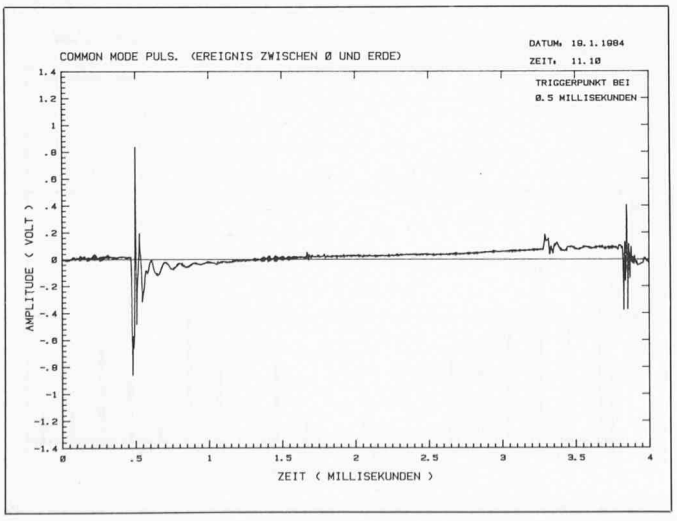
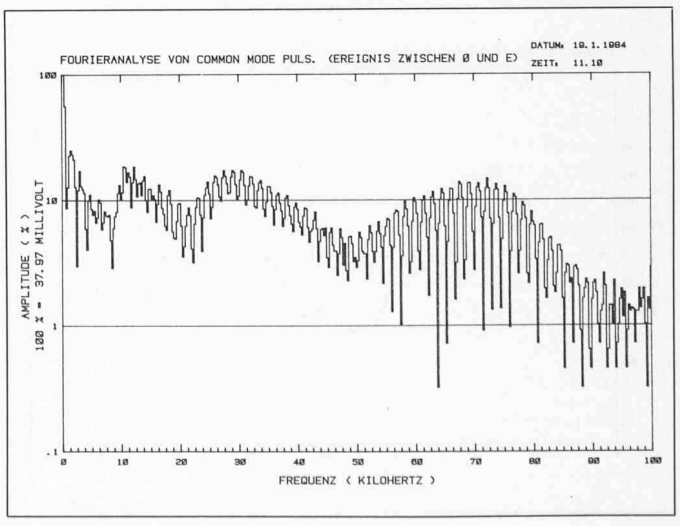


Bild 4. Fourieranalyse von Common Mode Puls



- In einem Supermarkt geriet die zentralisierte Registrierkassenerfassung gelegentlich durcheinander. Grund: Ein defekter Transformer der Neonbeleuchtung war in den Zustand der magnetischen Sättigung wegen intermittierendem Wicklungsschluss geraten und hatte starke Harmonische produziert.
- In einigen Haushalten einer Siedlung aus Einfamilienhäusern war der Fernsehempfang stark gestört. Die Hochfrequenzseite wurde ohne Befund geprüft. Ursache: Das Umschaltschütz einer Waschmaschine funkte wegen defekten Kondensatoren bei jedem Drehrichtungswechsel stark. Dies hatte Spikes bis 250 V zur Folge.
- Aus unerklärlichen Gründen fiel die Rundsteueranlage eines mittleren Elektrizitätswerkes für mehere Tage aus, um danach wieder einwandfrei zu funktionieren. Nachträglich erfuhr man, dass eine überregionale Hochspannungsleitung wegen Revisionsarbeiten abgeschaltet worden war. Daher konnten die Störungen einer Lichtbogenofenanlage sich auf einem niedrigeren Spannungsniveau über viele Kilometer ausbreiten.

Messtechnik

Die messtechnische Erfassung der beschriebenen Erscheinungen erfordert sehr unterschiedliche Messgeräte. Die Erfassung divergiert stark, je nach dem, ob dauernde, eventuell reproduzierbare Phänomene gemessen werden oder ob spontane Ereignisse festzuhalten sind. Die Messtechnik ist heikel, da äusserst schnelle und teilweise sehr selten auftretende Vorgänge zu beobachten sind. Schon daraus lässt sich ablesen, dass die Konzentration der anfallenden Datenmengen, ihre Speicherung und die Trennung des Wesentlichen vom Unwesentlichen Problemschwerpunkte sind. Solche Aufgaben sind nur mit hochentwickelter Elektronik zu lösen. Entsprechende Messgeräte sind sehr teuer. Ihre Bedienung ist für ungeübtes Personal schwierig, und die Interpretation der Ergebnisse erfordert einige Erfahrung. Die Messarbeit findet meist an oder in der Nähe ungeschützter Starkstromanlagen statt; sie darf daher nur von Personen geleistet werden, die im Sinne der SEV-Vorschriften instruiert sind.

Standardmessgeräte sind:

- Transientenrecorder und Detektoren (Dranetz o. ä.),
- Speicheroszillographen,
- selektive Voltmeter,
- Frequenzanalysatoren «Bank of Filters»-Typ, durchstimmbare Geräte, FFT-Geräte,
- Kurzschlussmesser zur Ermittlung der Netzimpedanz (50 Hz),
- mittlere Tischcomputer für Signalbehandlung, Auswertung und Statistik,
- Datenträger wie Bandkassetten und Floppy Disks,
- Drucker, Plotter, Linienschreiber für die Darstellung.

Normen

Das Abfassen von Normen für unerwünschte Komponenten hat erst - und zum Teil provisorisch - begonnen; es gibt sogar Widersprüche. Von den zuständigen Gremien SEV, VSE, VDE, Cenelec, Cispr wird an den Normen und ihrer Harmonisierung gearbeitet. Das zurzeit wichtigste Papier ist die Norm SEV-EN 50.006, die Oberschwingungspegel, Über- und Unterspannung (Flicker) samt Statistik, aber nicht Impulse (Spikes) behandelt. Da die Praxis den Normen in manchen Punkten voraus ist, muss vieles im Einzelgespräch abgewogen und mit Verstand und gutem Willen beurteilt werden.

Massnahmen

Zur Minimierung der unerwünschten Komponenten im Starkstromnetz sind an allen Hauptkomponenten des Systems Massnahmen möglich.

Beim Störer. Diese Massnahmen sind am wirkungsvollsten; sie sanieren aber nur den Störer, für den sie getroffen werden. Die gebräuchlichsten Methoden sind:

- Wahl von wenig störträchtigen Schaltungen und Funktionsprinzipien,
- Anordnung von Filtern,
- Einschränkung besonders störender Betriebszustände,
- Sperrung zu gewissen Tageszeiten.

Bei der Koppelung. Zunehmend wird darauf geachtet, die Übertragungsnetze möglichst störfest zu machen. An Massnahmen sind denkbar:

- gesonderte Speisung unvermeidbarer Störer,
- Erhöhen der Kurzschlussleistung,
- Verbessern des Blitzschutzes,
- günstigere Auslegung der Transformer,
- Aufteilung in Fein- und Grobnetz (in der Industrie),
- gesonderte Speisung besonders empfindlicher Geräte.

Beim Störopfer. Allgemein ist es vorteilhaft, den Geräten von der Konstruktion her eine gute Störfestigkeit mitzugeben. Zusätzliche Massnahmen sind:

- Anordnung von Eingangsfiltern,
- Anordnen von Netzstabilisatoren,
- Verbesserung der Erdungsverhältnisse,
- Elimination von Induktionsschlaufen in komplexen Systemen.

Die Wahl der Massnahmen zum Entstören hängt von den Randbedingungen ab. Sehr wichtig ist, ob die Störungen von wenigen bekannten Quellen (Industrie) ausgehen oder ob eine grössere Zahl von «Netzverschmutzern» diffus verteilt vorliegt (z. B. Fernseher, Haushaltgeräte, Kleincomputer). Im ersten Fall ist über die Massnahmen sowie ihre Kostenträger zu diskutieren, im zweiten Fall liegt fast ein «elektrosoziales» Problem vor, da es zahlreiche Verursacher aber keine Kostenträger gibt. Die Eingriffe verursachen in jedem Fall, zentral oder dezentral, erhebliche Kosten.

Das Dilemma der modernen Elektrotechnik

Leider sind die meisten Störer Geräte, die sich besonders zum Energiesparen eignen. Elektronische Regler arbeiten quasi verlustlos, regeln ohne Stufen und sind ausserordentlich geschmeidig in der Anpassung an die verschiedenen Aufgaben. Sie haben keine bewegten Teile, verursachen keine Schwingungen, produzieren wenig Verlustwärme, brauchen kaum Fundamente und keinen Unterhalt. Sie kommen dem technischen Ideal bezüglich der Hauptfunktion sehr nahe. Aber sie belasten das speisende Netz mit unvermeidbaren Rückwirkungen.

Damit ist die Gewichtung des technischen Fortschritts im Hinblick auf seine Nebenwirkungen angesprochen. Ein weitgehendes Verbot moderner, wirtschaftlich arbeitender Geräte über beispielsweise drakonische Vorschriften hiesse den Fortschritt verbieten. Ein undifferenziertes Laisser-faire würde rasch zu unerträglichen Zuständen führen. Es liegt daher in der Verantwortung der Vorschriften erlassenden Gremien, einen gang- und tragbaren Mittelweg zum Vorteil aller Beteiligten offenzuhalten.

Blick auf Nachbargebiete

Das Thema «Unerwünschte Komponenten im Starkstromnetz» betrifft nur ein kleines Segment der elektromagne-

tischen Verträglichkeit (EMV) oder Electromagnetic compatibility (EMC). Der vorliegende Aufsatz beschränkt sich auf Komponenten im Starkstromnetz, also auf leitungsgebundene Phänomene. Die Elektrizität ist aber überall; elektrische und magnetische Felder umgeben uns ständig.

Die Definitionen von Wirkung - Koppelung - Betroffensein sind ganz ähnlich wie die von Störer - Koppelung - Störopfer, nur viel allgemeiner.

Die Reihe der Nachbargebiete, die in dieses Schema passen, ist fast endlos: Radio und Fernsehen, Datenübertragung, Radar, industrielle Mikrowellen, nuklearer elektromagnetischer Puls (NEMP), bioelektrische Systeme, Elektrochemie, Elektromedizin, Radioaktivität, Lasertechnik, Astrophysik.

Die Erkenntnis, dass in der Natur gewisse Muster einander immer gleichen, ist fundamental. Sie ist der Ausfluss einer grandiosen Wissenschaft: der Physik in ihrer Anwendung durch die Elektrotechnik.

Adresse des Verfassers: *P. Zaruski*, dipl. El.-Ing. ETH/SIA/ASIC, Ingenieurbüro für elektr. Anlagen, Stapferstr. 19, 8006 Zürich

Ingenieurgeologie in der Schweiz

Ursprung und Entwicklungsmöglichkeiten

Von Conrad Schindler, Zürich

Ingenieurgeologie - was ist der Sinn dieses Wortes? Es erinnert an einen Januskopf mit einem technischen und einem naturwissenschaftlichen Gesicht. Sollen hier Leute wirken, welche eine Ausbildung sowohl als Ingenieur wie auch als Geologe durchlaufen haben und nun von zentraler Warte her alles überblicken? Oder überwiegt - je nach Betonung - die eine oder andere Seite des Wortes? Die heute international eingebürgerte Bezeichnung «Ingenieurgeologie» wirkt mehrdeutig und reizt zu Kontroversen.
Vorerst sei dieser Streit um Worte aber zugunsten des Versuchs verlassen, die Entwicklung und Problematik dieses Faches anhand weniger Beispiele aus der Ost- und Zentralschweiz zu skizzieren.

Bisherige Entwicklung

«Pfahlbauer»

Einführungsvorlesungen beginnen meist mit Goethe oder den alten Römern. Da aber Geologen mit ungewohnt langen Zeiträumen rechnen, sei der Anfang bei den ersten sesshaften Ackerbauern unseres Landes gesucht, also in der Jungsteinzeit. Damals wurden nahe den Seeufern Siedlungen errichtet, wobei im Laufe der Zeit eine gewaltige Zahl von Pfählen in den Seegrund eingerammt wurde. Bemerkenswert für unser Problem ist, dass die damaligen Siedler - die «Pfahlbauer» - offensichtlich bewusst einen ganz bestimmten Baugrund aufsuchten, nämlich Seekreide. In dieser lässt sich ein Pfahl zwar anfänglich fast mühelos eintreiben, doch wird er bald eine beschränkte Tragfähigkeit erreichen. Dies gilt auch für den häufigen Fall, dass kein hartgelagerter Untergrund erreicht wird, also ein «schwimmender» Pfahl vorliegt. Ein Vergleich der jungsteinzeitlichen und bronzezeitlichen Siedlungsplätze mit der geologischen Karte des Zürichsees [1, 2] zeigt, dass diese grösstenteils eindeutig auf Seekreide angelegt wurden. Wie fanden sie diese aber? Man muss annehmen, dass *Versuche* zu diesem Resultat führten, wobei insbesondere auch Fehlschläge wichtige Erfahrungen brachten, sofern sie berücksichtigt und ausgewertet wurden - eine Regel, welche für unser Fachgebiet bis heute ihre Geltung behalten hat.

Beweise für einen solchen Fehlschlag brachte die Grabung AKAD in Zürich-Seefeld, wobei eine aus der Pfyner Kultur (3500–4000 v. Chr.) stammende, umgekippte Pfahlkonstruktion entdeckt wurde (Bild 1) [1]. Vor fast 6000 Jahren hatten die damaligen Baumeister zwar Seekreide gefunden, doch waren die Pfähle sehr bald an der Grenze einer grobkörnigen, härteren Schicht steckengeblieben, in moränenähnlichen eiszeitlichen Seeablagerungen.

Die Erfahrung zeigte somit, dass der Pfahl mindestens so weit in den Seegrund eindringen musste, dass die seitliche Verspannung eine Verkippung verhindern konnte. Offensichtlich hat sich dieser Befund unter Kollegen rasch herumgesprochen, denn Spuren ähnlicher Missgeschicke sind am Zürichsee bisher nirgends mehr ausgegraben worden.

Entwicklung bis um 1800

Der Boden diente seit je nicht nur als Baugrund, sondern gewann als Lieferant von Rohstoffen immer grössere Bedeutung. Dabei forderten die meist mühseligen Transportbedingungen eine möglichst kurze Distanz zwischen Ausbeutungsstelle und Verbrauchsort, auch wenn die Qualität des Materials allenfalls zu wünschen übrig liess.

Genannt seien z.B. Lehm für die Töpferei oder Steine zum Herstellen von Werkzeugen, später auch zum Errichten von Gebäuden. Sehr bedeutsam wurde auch die Gewinnung und Verhüttung von Erzen für die Metallherstellung. Gerade die frühen Bergwerke - z.B. auch auf Silex oder Salz - oder die Steinbrüche boten schwierige Probleme des Abbaus, der Hangstabilität, aber auch der Absicherung von Hohlräumen gegen Einsturz. Es bildeten sich deshalb sehr früh Gruppen von Spezialisten, deren Tätigkeitsgebiet gegenüber heutigen Fachleuten noch sehr breit war, während ihre Hilfsmittel dagegen recht bescheiden blieben. Ihr Wissen beruhte zu einem grossen Teil auf Überlieferung und Erfahrung, war aber zudem von genauer Beobachtung, Intuition und nichtnaturwissenschaftlichen Praktiken begleitet, wie dies ein Bild aus dem Jahre 1557 zeigen mag (Bild 2). Bei der Erzsuche wurden zwar einerseits Sondierschächte abgeteuft und Handstücke untersucht, anderseits kam aber auch die Wünschelrute zum Einsatz. Dazu meinte der kritische Autor *Agricola* (1557): «Derhalben ein Bergkmann, dieweil er ein frommer ernstlicher Mann sein solle, gebraucht der zauber ruten in keinem Weg, denn er ist der natürlichen Dingen erfaren

Überarbeitete Fassung der Einführungsvorlesung an der ETH Zürich vom 7. Juni 1983