

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:	86 (1995)
Heft:	1
Artikel:	Nur EMV-konforme Produkte sind europatauglich : eine Übersicht über die Niederfrequenz-EMV-Normen
Autor:	Weiler, Jean
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-902409

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>

Alle Geräte, welche für den freien Warenmarkt konzipiert sind (dazu gehören auch leistungselektronische Systeme wie z.B. die netzseitigen Speisegeräte elektronischer Systeme), müssen gewissen Minimalanforderungen bezüglich Sicherheit und elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) genügen. Im Bestreben, die Grundsätze zu vereinheitlichen und damit nichttarifarische Hemmnisse soweit wie möglich zu eliminieren, hat die Kommission der Europäischen Union (EU) eine Direktive über die elektromagnetische Verträglichkeit erlassen, welche durch entsprechende internationale Normen konkretisiert wurde und wird. Die Kenntnis und Einhaltung dieser Normen ist damit auch für Schweizer Produkte lebensnotwendig. Im folgenden soll aus dem ganzen Normenspektrum insbesondere das Gebiet der Niederfrequenz-EMV betrachtet werden, verbunden mit einer kurzen Zusammenfassung der derzeit relevanten Normen und einem Ausblick auf in der Entwurfsphase befindliche Normen.

Nur EMV-konforme Produkte sind europatauglich

Eine Übersicht über die Niederfrequenz-EMV-Normen

■ Jean Weiler

Im Prinzip dürfen ab 1.Januar 1996 innerhalb der Europäischen Union (EU) nur noch Geräte und Anlagen in den Handel gebracht werden, welche das CE-Zeichen tragen (siehe Bild 1). Dieses Zeichen bedeutet, dass das Produkt konform ist mit den relevanten EU-Vorschriften.

Der Nachweis der Konformität kann auf verschiedenen Wegen erfolgen; der einfachste dürfte sein, dass nachgewiesen wird, dass das Produkt bestimmten internationalen, das heisst EU-Regeln entspricht, also die relevanten *Normen* (gemäss Duden: «allgemein anerkannte, als verbindlich geltende Regeln») einhält. Dies hat dazu geführt, dass in vergangenen Jahren eine Reihe von Normen neu entstanden sind oder dass bestehende Normen überarbeitet wurden, welche insbesondere auch für Geräte der Leistungselektronik und Geräte, welche leistungselektronische Unter systeme enthalten, von Wichtigkeit sind.

Diese Flut von neuen nationalen und internationalen Normen bringt mit sich, dass die Übersicht für den einzelnen sehr schwierig wird, weshalb die Akzeptanz

problematisch ist. Letztendlich haben diese Normen aber einige ganz bestimmte Ziele, von denen die wichtigsten sind:

- Sicherheit (Unfallverhütung) und Betriebszuverlässigkeit
- Reduktion der Umweltbeeinflussung (im weitesten Sinne)
- freier Warenverkehr

Die für den hier zu betrachtenden Problemkreis wichtigste Normengruppe befasst sich dabei mit Fragen der EMV (elektromagnetische Verträglichkeit, englisch EMC: Electromagnetic Compatibility). Hierunter werden sämtliche Phänomene verstanden, welche aufgrund elektrischer Vorgänge und Zustände:



Bild 1 Das EU-Konformitätszeichen

Adresse des Autors:

Prof. Dr. Jean Weiler, Professur für Leistungselektronik und Messtechnik, ETH Zentrum/ETL, 8092 Zürich.

Elektromagnetische Verträglichkeit

- die Funktionstüchtigkeit eines elektrischen Gerätes beeinflussen können
- die elektromagnetische Umgebung eines Gerätes beeinflussen

Grundlegend ist die «Richtlinie des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit (89/336/EWG)». Sie befasst sich mit dem generellen Problem der elektromagnetischen Verträglichkeit von Produkten. Sie deckt frequenzmäßig den ganzen technisch genutzten Teil des Spektrums ab und ist damit auch für leistungsgebundene Störungen massgebend.

Ahnliche Regeln haben auch (bereits viel früher) im Schweizerischen Elektrizitätsgesetz ihren Niederschlag gefunden,¹ sei es als explizite Gesetzesvorschriften oder als Verweis. Zusätzliches Gewicht erhalten sie durch das neue Produkthaftpflichtgesetz.

Normungsgremien

International sind für die Normung im Bereich der Elektrotechnik zwei Gremien von hervorragender Wichtigkeit, die IEC und die Cenelec.

IEC: International Electrotechnical Commission

Derzeit sind es 43 Länder, welche in über 200 Technischen Komitees weltweit gültige Normen erarbeiten. Federführend für Probleme der elektromagnetischen Verträglichkeit ist das TC 77 mit seinen zwei Unterkommissionen SC 77A (niederfrequente Phänomene) und SC 77B (hochfrequente Phänomene):

- IEC-Normen beruhen auf einer internationalen Übereinkunft und sind «Empfehlungen», ohne dass ihre Anwendung vorgeschrieben ist.

¹ Verordnung über Elektrische Niederspannungserzeugnisse (AS 1992).

Art. 3 Sicherheit

Elektrische Erzeugnisse dürfen ... weder Personen noch Sachen gefährden. Sie müssen nach den anerkannten Regeln der Technik hergestellt ...

Als anerkannte Regeln der Technik gelten insbesondere die international harmonisierten Normen. Wo diese fehlen, gelten die Regeln des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, die technischen Vorschriften der PTT-Betriebe, die Vorschriften der GRD ...

Art. 4 Vermeidung von Störungen

Elektrische Erzeugnisse müssen ..., dass sie den bestimmungsgemäßen Gebrauch von andern elektrischen Erzeugnissen ... nicht in unzumutbarer Weise stören.

Störunggefährdete elektrische Erzeugnisse müssen ..., dass ihr bestimmungsgemäßer Gebrauch nicht durch andere elektrische Erzeugnisse und Niederspannungsinstallationen in unzumutbarer Weise gestört wird.

Treten trotz Beachtung der anerkannten Regeln der Technik unzumutbare Beeinflussungen auf ...

Cenelec: Commission Européenne de Normalisation Electrotechnique

Ursprünglich war die Cenelec ein Organ der EG; an ihr beteiligen sich aber die meisten weiteren europäischen Länder (unter ihnen auch die Schweiz). Die Cenelec initiiert Normenarbeiten, soweit sie nicht bereits in der IEC abgedeckt sind, und übernimmt in den meisten Fällen neue IEC-Normen in einem vereinfachten Verfahren. In der Cenelec entspricht das TC 110 dem IEC TC 77.

- Cenelec-Normen (EN xxxx) beruhen auf einer europäischen Übereinkunft; jedes Cenelec-Mitglied ist verpflichtet, solche Normen unverändert als nationale Norm zu übernehmen.

Die beiden genannten Gremien werden national durch entsprechende Gesellschaften vertreten, in der Schweiz durch den SEV/ASE.

SEV: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein

Der Schweizerische Elektrotechnische Verein (SEV) ist für die Schweiz auf dem Normungsgebiet (für elektrotechnische Belange) tätig (siehe Fußnote 1), sei es durch Erarbeitung eigener Normen oder durch Übernahme internationaler Normen. Der SEV ist Mitglied sowohl von IEC wie von Cenelec und damit gehalten, die entsprechenden Normen in Schweizer Recht überzuführen. Ähnliche Organisationen existieren auch in praktisch allen andern Ländern.

- SEV-Normen sind rein schweizerische (nationale) Normen ohne Wirkung nach aussen. Von der Schweiz übernommene Cenelec-Normen haben Priorität vor den nationalen.

Weitere Gremien

Auf die Koordination der Normeninhalte haben weitere Gremien Einfluss wie CISPR (internationale Studienkommission für Radiostörungen), Cigre/Cired/Unipede (internationale Vereinigungen von Erzeu-

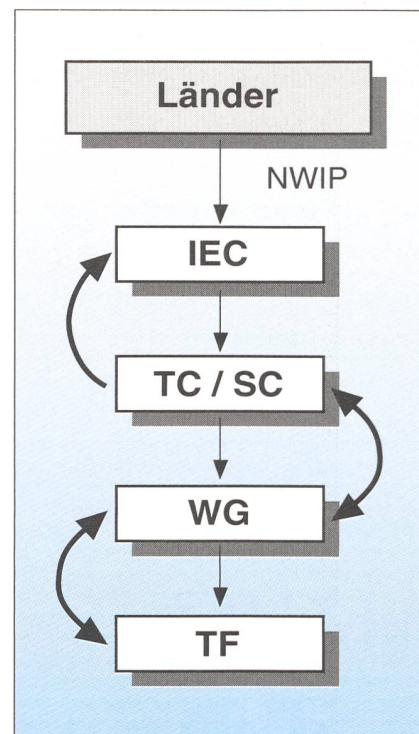


Bild 3 Weg der Erarbeitung einer Norm
dünne Pfeile: Befehlsrichtung; dicke Pfeile: Weg der Vorschläge

gern und Grossverteilern elektrischer Energie), UIE (Union Internationale d'Electrothermie, sinngemäss Grossverbraucher) usw.

Allen obenerwähnten Gremien ist gemeinsam, dass sie (zumindest soweit es ihre Normenaktivitäten betrifft) nur Rahmenstrukturen sind, welche eine Leitung und gewisse Infrastrukturdienste aufweisen. Die eigentliche Arbeit wird von Freiwilligen in multinational zusammengesetzten Technischen Komitees (TC, Technical Committee) und deren Untergruppen geleistet. Für die Erarbeitung der EMV-Normen haben zudem Cenelec und IEC eine Vereinbarung getroffen, gemäss welcher die Federführung in der Regel bei IEC liegt. Als Beispiel ist in Bild 2 die Struktur der IEC festgehalten, wobei beispielhaft das Tech-

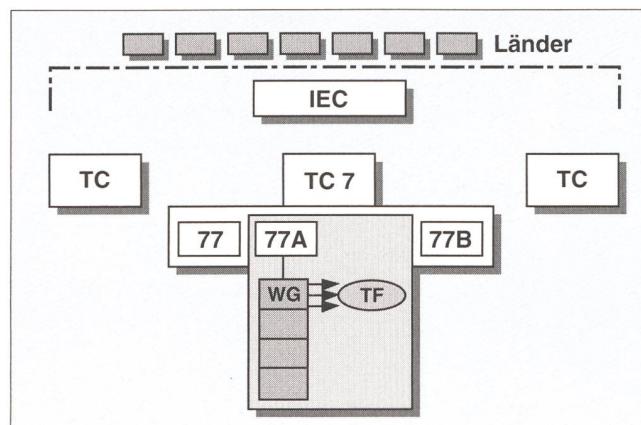


Bild 2 Schematischer Aufbau der IEC

nical Committee 77 (EMC) angeführt ist. Die Unterkomitees von TC 77 sind für spezifische Themenbereiche zuständig:

- SC 77 Allgemeines, insbesondere Terminologie
- SC 77A Niederfrequente (insbesondere leitungsgebundene) Beeinflussungen
- SC 77B Hochfrequente Beeinflussungen
- SC 77C NEMP(Nuclear electromagnetic pulse)-Beeinflussungen

Eine ähnliche Struktur weist auch Cenelec auf; lediglich ist hier für die EMV-Bereiche das TC 110 zuständig. Auf Landesebene können beliebige Strukturen vorhanden sein für die Behandlung der verschiedenen Normierungsgebiete. In der Schweiz besteht beim SEV für die IEC- und Cenelec-Aktivitäten eine «Schattenstruktur», in welcher sämtliche TCs unter der gleichen Numerierung vorhanden sind. Weitere Details und Mitgliederlisten findet man im aktuellen Jahresheft des Bulletin SEV/VSE.

Die Initiative für eine neue Norm geht von den Mitgliedsländern aus. Wenn eine Mehrheit dieser Initiative (NWIP, New Work Item Proposal) zustimmt (was in der Regel auch die Benennung von Experten beinhaltet), muss die Arbeit in Angriff genommen werden. Der Ablauf für die Erstellung einer Norm nach Annahme des NWIP ist in Bild 3 prinzipiell festgehalten. IEC erteilt dem entsprechenden Technical Committee (TC) den Auftrag, welcher zur Bearbeitung an das entsprechende Sub-Committee (SC) und dort an die spezialisierte Working Group (WG) geht. Die WG setzt normalerweise eine Task Force (TF) ein, welche einen ersten Entwurf zuhanden der WG erarbeitet. Nach mehreren Iterationen geht dieser Entwurf dann zum TC zurück, wo über das weitere Vorgehen entschieden wird. Findet der Entwurf Zustimmung, so geht er an die Länder zur Vernehmlassung (Sekretariats-Dokument). Die Länderkommentare werden gesammelt, ausgewertet und der WG zugeleitet. Die TF erarbeitet, basierend auf den Kommentaren, einen neuen Vorschlag usw.

Sobald Aussicht auf einen Konsensus besteht, wird der Vorschlag den Ländern wieder zugeleitet, wobei jetzt die Frage gestellt wird, ob sie bereit sind, den Vorschlag als Normenentwurf (DIS, Draft International Standard) zuzulassen. Bei genügender Zustimmung setzt dann der (letzte?) Schritt ein: Der Vorschlag wird den Ländern zur Abstimmung unterbreitet (Central Office[CO]-Dokument). Bei mehr als 75% Ja-Stimmen ist der Vorschlag dann angenommen und erlangt den Status einer Norm.

Neue und modifizierte IEC-Normen gehen in der Regel nicht nur in die IEC-Ab-

Niederfrequenz (<2,5–9 kHz)	\leftrightarrow	Hochfrequenz (>10 kHz)
leitungsgebunden	\leftrightarrow	Strahlung
öffentliche NS-Netze (230/400 V)	\leftrightarrow	Industrienetze (MS/HS-Anschluss)
Massengeräte	\leftrightarrow	Einzelgeräte
Niederleistungsgeräte (Massengeräte, <16 A)	\leftrightarrow	Hochleistungsgeräte (>16 A)
Umgebung	\leftrightarrow	Produktgruppe

Tabelle I Mögliche Klassierung der EMV-Phänomene

NS	Niederspannung
MS	Mittelspannung (<36 kV)
HS	Hochspannung (>36 kV)
NF	Niederfrequenz (<9 kHz?)
HF	Hochfrequenz (>9 kHz?)

stimmung, sondern werden in einem parallelen Abstimmungsverfahren auch den Cenelec-Ländern vorgelegt. Im günstigsten Fall werden sie dann sowohl internationale Empfehlungen als auch – für die Cenelec-Länder – bindende Vorschriften.

EMV-Normen

Das Gebiet der EMV ist außerordentlich vielschichtig, wobei die einzelnen Bereiche nur schwierig abzugrenzen sind. Mögliche Unterteilungen sind in Tabelle I angegeben. In der Praxis werden diese Klassierungen nicht starr eingehalten, das heisst es werden gemischte Klassierungen verwendet. Auch die angegebenen Grenzen sind (zumindest teilweise) fliessend.

Unterschieden werden muss generell (unabhängig vom Phänomen) zwischen Kompatibilitätswerten (Grenzwerte, welche – statistisch gesehen – das Phänomen z. B. mit 95% Wahrscheinlichkeit nicht überschreiten wird) und Immunitätswerten (Werte, bei welchen das Gerät noch zufriedenstellend funktioniert) (siehe Bild 4).

Vom Anwendungsbereich her unterscheidet man drei Typen² von Normen (von denen hier nur die englischen Bezeichnungen angegeben werden, da sie international verständlich sind):

Basic Standards: Sie enthalten generelle und grundlegende Bedingungen oder Regeln für die Erzielung einer genügenden elektromagnetischen Kompatibilität. Sie dienen als Grundlage für alle weiteren Arten von Normen. Insbesondere beschreiben Basic Standards die behandelten Phänomene (inbegriffen die Terminologie) und geben die messtechnischen Grundregeln an.

Generic Standards: Sie sind Normenwerke, welche sich auf eine bestimmte An-

wendungsumgebung beziehen und eine Minimalmenge von grundlegenden Erfordernissen und Testprozeduren beschreiben, welche gültig sind für alle Geräte in dieser Umgebung. Sie gelten, solange keine spezifischen Normen für eine bestimmte Gerätetypen bestehen.³ In ihrer einfachsten Form enthalten Generic Standards nur eine Aufzählung der relevanten Basic Standards.

Product Family Standards: Sie umschreiben spezifische EMV-Erfordernisse und Testprozeduren für definierte Gerätetypen (Gerätegruppen). Sie beruhen auf den Basic Standards und müssen mit den Generic Standards koordiniert sein (Abweichungen von den Generic Standards sind nur in Einzelfällen möglich; Abweichungen von Basic Standards müssen begründet werden). Product Standards haben ansonsten Vorrang vor den andern Normen.

Im folgenden soll aus der Vielzahl von EMV-Normen, welche relevant sind, speziell das Gebiet der niederfrequenten (leitungsgebundenen) Störungen betrachtet werden. Theoretisch dürften hier nur die Frequenzkomponenten bis ungefähr 3 kHz enthalten sein; aus praktischen Gründen wird jedoch (soweit notwendig) der Frequenzbereich bis zum Rundfunk-Langwellenbereich (<150 kHz) berücksichtigt werden.

Niederfrequenz-Normen

Unter dieser Rubrik werden Grenzwerte sowohl für Spannungsverzerrungen als auch für Stromverzerrungen betrachtet. Meistens werden Spannungsverzerrungen als Ergebnis angesehen; sie bilden *Immisionen* für andere Geräte. Ursache sind üblicherweise Stromverzerrungen; sie werden deshalb als *Emissionen* bezeichnet.

Die eigentlichen NF-EMV-Normen werden in IEC wie folgt systematisiert (Hinweis: die Numerierung ist im Umbruch, ältere Normen haben u. U. abweichende Bezeichnungen). IEC-Nomenklatur: IEC 1000-x-fortlaufende Nummer; dabei bedeutet:

³ Derzeit bestehen (oder sind in der Abstimmungsphase) folgende Generic Standards:

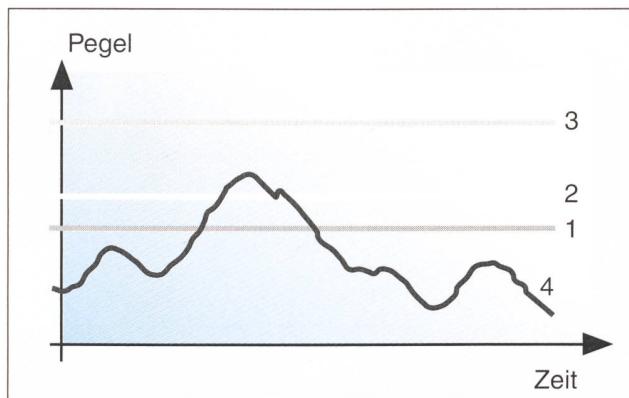
1. Residential, commercial and light industry environment (EN 50081-1 für Emission, EN 50082-1 für Immunity)

2. Industrial environment (EN 50 081-2 für Emission, EN 50 082-2 für Immunity).

Ihr Schicksal ist derzeit noch unbestimmt: Allen ist gemeinsam, dass Niederfrequenzeinflüsse nicht darin enthalten sind. Aus diesem Grund wurden sie von der Schweiz abgelehnt, zum Teil auch von so vielen weiteren Mitgliedern der Cenelec, dass sie nicht in Kraft gesetzt werden können. Bei einer Inkraftsetzung wird sich allerdings die Frage stellen, wie wir damit umzugehen haben.

² Gemäss ACEC(Central Office)31 von 1993-03.

Elektromagnetische Verträglichkeit



- $x = 1$ Generelles, Terminologie
- $x = 2$ Umgebungsbedingungen
- $x = 3$ Grenzwerte
- $x = 4$ Messtechnik
- $x = 5$ Installations- und Schutzhinweise
- $x = 9$ Verschiedenes

Die zu den IEC-Normen gehörenden Cenelec-Normen tragen eine Nummer, welche aus der Addition von 60 000 zur IEC-Nummer entsteht (z. B. IEC 1000-2-1 wird EN 61000-2-1).

Die nachfolgend angegebenen Nummern sind die aktuell verwendeten, das heisst, es sind – je nachdem – die «alten» oder die neuen. Längerfristig, spätestens bei einer Revision einer bereits bestehenden Norm, sollte nur noch die neue Numerierung zum Zuge kommen.

Immissionen (Spannungsverzerrungen)

Unter *Immissionen* werden externe Einflüsse verstanden, welche die Funktionsfähigkeit einer Anlage beeinträchtigen können.

Quellen

IEC 1000-2-1: Electromagnetic compatibility – description of the environment: IEC 1000-2-1 ist ein Technical report (Leitfaden), welcher in prägnanter Form die einzelnen Phänomene und Geräte oder Geräteklassen, welche Immissionen verursachen,

Bild 4 Kompatibilitäts- und Immunitätspegel

- 1 Kompatibilitätspegel
- 2 Immunitätspegel für ein weniger wichtiges Gerät
- 3 Immunitätspegel für ein wichtiges Gerät
- 4 tatsächlicher Verlauf der Störgrösse

3. Das Einschalten von Lasten bewirkt Spannungsabsenkungen, welche die Speisung anderer Lasten beeinflussen. Wiederholte Ein- und Ausschaltungen von Lasten bewirken wiederholte Spannungsschwankungen, welche zu Fluktuationen der Helligkeit von Glühlampen führen (Flickerscheinungen).⁴ Zusätzlich können durch Schaltoperationen kurzzeitige (transiente) Über- oder Unterspannungen entstehen.

Die maximal zu erwartenden Werte sind wichtig für die Auslegung von Geräten, das heisst für die Bestimmung der notwendigen Immunität.

Relevante Normen

IEC 1000-2-2: Electromagnetic compatibility – compatibility levels for low frequency conducted disturbances: IEC 1000-2-2 ist eine Norm (also eine *bindende* Vorschrift), in welcher die maximal zu erwartenden Werte für die Immissionen zahlenmäßig festgeschrieben werden. Die zulässigen Pegel für Harmonische sind in Tabelle II angegeben.

Hinweis 1: Die in Tabelle II aufgeführten Pegel dürfen nicht gleichzeitig in voller Grösse auftreten. Ihre Gesamtsumme ist begrenzt durch den zulässigen Klirrfaktor k (oder THD)⁵:

$$k = \sqrt{\sum_2^{40} u_n^2} \leq 8\% \quad (u_n = U_n / U_1) \quad (1)$$

Hinweis 2: Dies sind die resultierenden Kompatibilitätspegel; sie sagen nichts darüber aus, wieviel Spannungsverzerrung durch eine gegebene Last am Verknüpfungspunkt zulässig ist! Generell kann man davon ausgehen, dass für die Summe aller Lasten an einem Speisepunkt nur $\frac{1}{4}$ der oben angegebenen Werte zur Verfügung steht; $\frac{3}{4}$ werden bereits aus den höheren Spannungsebenen übertragen.

Hinweis 3: Die hier aufgeführten Werte scheinen irgendwie willkürlich. Sie sind aber aufgrund breiter angelegter Untersuchungen festgelegt worden. In der Schweiz werden seit vielen Jahren vom Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE/UCS) Untersuchungen über die auftretenden Pegel durchgeführt. Die aktuellen Ergebnisse sind in Bild 5 angeführt.

EN 50065-1: Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen im Frequenzbereich 3 kHz bis 148,5 kHz: Auf den ersten Blick hat diese Norm nichts mit

⁴ Siehe auch im Kapitel Emissionen (Stromverzerrungen) unter Relevante Normen den Abschnitt zu SN 413600: Die Schweizer Norm.

⁵ Aus praktischen Erwägungen wird in allen EMV-Normen für den Klirrfaktor (Total Harmonic Distortion, THD) nicht die übliche Definition «Effektivwert der Oberschwingungen / Gesamteffektivwert» verwendet, sondern die Konvention «Effektivwert der Oberschwingungen / Effektivwert der Grundschwingung».

Tabelle II Kompatibilitätspegel für einzelne Harmonische nach IEC 1000-2-2

n Ordnungszahl der Harmonischen

u_n Pegel der n -ten Harmonischen der Spannung in % der Bemessungsspannung

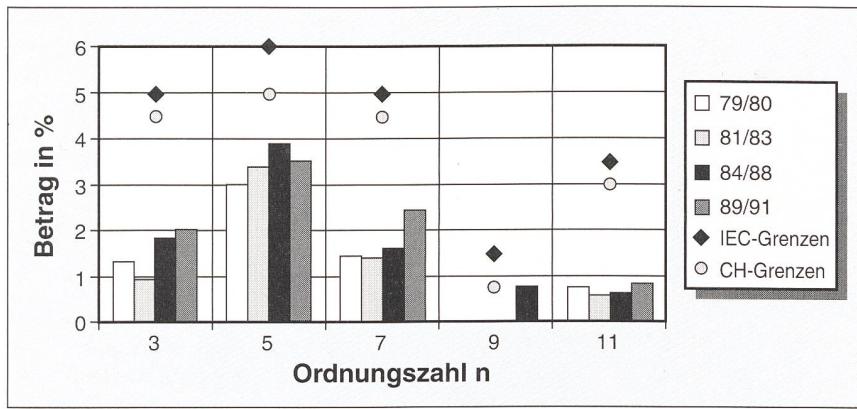
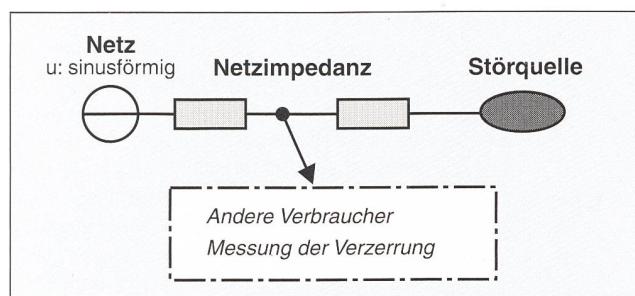


Bild 5 Spannungsoberschwingungen im Schweizer Niederspannungsnetz

Entwicklung der Spannungsoberschwingungen über die Jahre (95%-Auftretenswahrscheinlichkeit), verglichen mit den Kompatibilitätspeginen nach IEC und SEV 3600.

Bild 6 Ersatzschema für die Berechnung von Beeinflussungen



dem hier behandelten Problemkreis zu tun, da sie lediglich Angaben über die höherfrequenten Pegel für Signalübertragung über Energieversorgungsleitungen gibt. Diese Informationsübertragung ist (Postregal!) den Energieversorgungsunternehmen vorbehalten, mit Ausnahme des Frequenzbereiches 125–140 kHz, welcher für die sogenannte Home Automation verwendet werden darf. Allerdings darf im Prinzip aus diesem Band nichts nach aussen dringen.

Die maximalen Ausgangspegel der Sender dürfen im Frequenzbereich von 3 bis 9 kHz den Wert von 134 dB(µV) \triangleq 5 V nicht überschreiten; der zulässige Pegel nimmt mit zunehmender Frequenz ab und beträgt noch 120 dB(µV) (\triangleq 1 V) bei 95 kHz. Zwischen 95 kHz und 148,5 kHz sind noch 116 dB(µV) (\triangleq 0,63 V) zugelassen. Damit diese Übertragung ungestört bleibt, müssen die durch nichtharmonische Ströme erzeugten Spannungspegel wesent-

lich kleiner sein (z. B. kleiner als 10% dieser Werte). In gewissen Ländern (z. B. A, D, CH) sind exakte Werte mit Bezug auf die lokale Rundsteuerfrequenz angegeben:

- 0,1% von U_n auf der Rundsteuerfrequenz
- 0,3% von U_n in einem Frequenzband von ± 100 Hz um die Rundsteuerfrequenz
- Ausserhalb dieser Bereiche sind derzeit keine Grenzwerte definiert

Emissionen (Stromverzerrungen)

Unter *Emissionen* werden die Größen verstanden, welche direkt oder indirekt dazu führen können, dass andere Anlagen oder Geräte in ihrer Funktionstüchtigkeit beeinflusst werden.

Primär werden die oben aufgeführten Spannungsverzerrungen durch Stromverzerrungen verursacht (Ausnahme: Spannungsabsenkungen und Flicker). In erster

Linie müssen also diese Stromverzerrungen begrenzt werden. Die Spannungsverzerrungen folgen dann aus den Impedanzverhältnissen am gerade betrachteten Ort.

International gültige Normen sind vorgesehen für die folgenden niederfrequenten leitungsgebundenen Phänomene:

- Stromharmonische für Massengeräte (IEC 555-2, in Revision)
- Spannungsschwankungsgrenzen für Massengeräte (IEC 555-3)
- Stromharmonische für Hochleistungsgeräte (IEC 555-4, in der Entwurfsphase)
- Spannungsschwankungsgrenzen für Hochleistungsgeräte (IEC 555-5)
- Messmethoden für Harmonische (IEC 1000-4-7)
- Messmethoden für Flicker (IEC 868)

Vorgesehen sind Normen für

- Unsymmetrie von Drehstromnetzen
- Grenzwerte für Interharmonische

Für die Bewertung der Stromemissionen ist eine Kenntnis der Quellen und der aktuellen Netzimpedanz bei der betrachteten Frequenz unabdingbar. In einer ersten Stufe sollen deshalb die wichtigsten Oberschwingungs-Aussender betrachtet werden. Anschliessend sollen dann die entsprechenden Normen behandelt werden.

Für die Berechnung der Spannungsverzerrung kann vom Schema in Bild 6 ausgegangen werden, welches die Begriffe Störer (Perturbating source) und Beeinflusster (Perturbed load) erläutert. Es wird auch klar ersichtlich, dass der Gestörte in der Regel eine geringere Störung erfahren wird, als an der Störungsquelle messbar ist.

Quellen für verzerrte Netzströme

Im folgenden sollen die wichtigsten Schaltungen, wie sie auf der Netzseite von leistungselektronischen Systemen vorkommen, kurz aufgeführt werden. Hierzu werden einerseits die Prinzipschaltung, andererseits die charakteristischen Stromkurvenformen und ihre Fourierzerlegung angegeben. Dabei werden aus Gründen der Übersichtlichkeit idealisierte Verhältnisse und Stromkurvenformen verwendet, welche im Realfall leicht abweichend sein können. Die prinzipiellen Eigenschaften bleiben aber erhalten.

Stromrichter mit induktiver Glättung: Meist nur verwendet für drehzahlvariable Antriebe mit Gleichstrommotoren, seltener für Antriebe mit Wechselstrommaschinen (Bild 7).

Für den Strom ergibt sich folgende Näherung:

$$i(t) = \sqrt{2} [I_1 \sin(\omega t - \alpha) - I_5 \sin(5\omega t - 5\alpha) - I_7 \sin(7\omega t - 7\alpha) + I_{11} \sin(11\omega t - 11\alpha) + \dots]$$

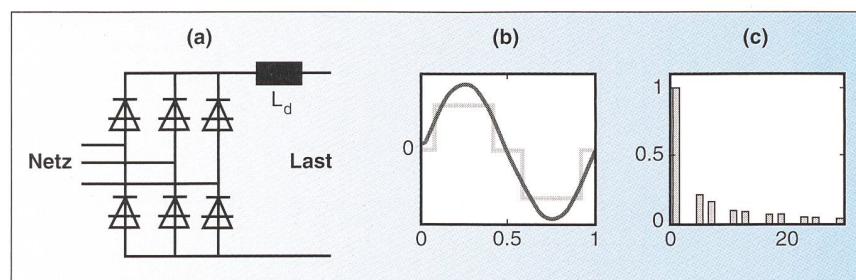


Bild 7 Gleichrichter mit induktiver Glättung

a Prinzipschaltung b Stromverlauf über 50-Hz-Periode c Fourierspektrum des Stromverlaufs

Elektromagnetische Verträglichkeit

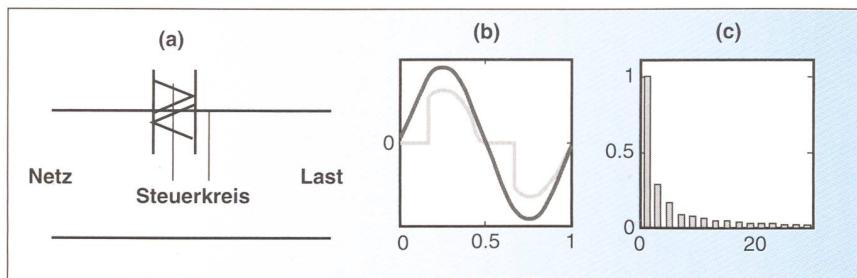


Bild 8 Phasenanschnitt bei ohmscher Last

a Prinzipschaltung b Stromverlauf über 50-Hz-Periode c Fourierspektrum des Stromverlaufs

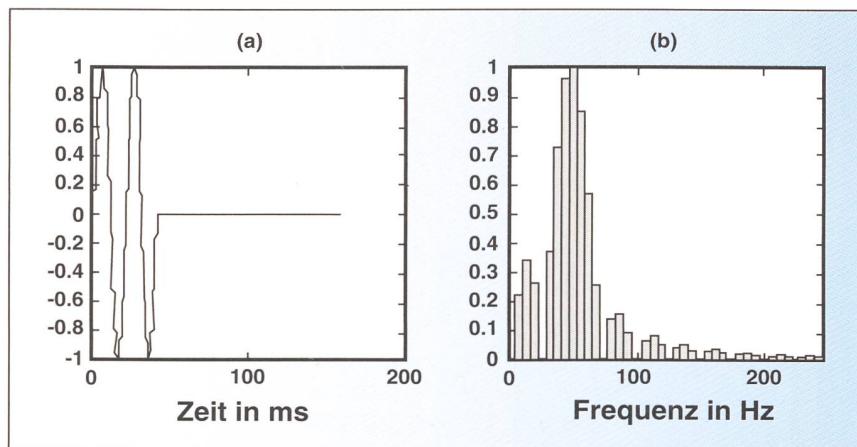


Bild 9 Schwingungspaketsteuerung mit zwei Leitperioden bei Gesamtdauer von acht Perioden
a Stromverlauf b Fourierspektrum des Stromverlaufs

mit $I_n = (\sqrt{6}/\pi)(I_d/n)$ und α = Zündwinkel. Bei nichtideal Glättung, also endlicher Glättungsdrossel L_d , verändert sich die Kurvenform und geht im Extremfall in eine Kurvenform gemäss Bild 11, b über.

Der Leistungsfluss wird durch Variation des Zündwinkels gesteuert. Dadurch verändert sich im wesentlichen die Kurvenform des Stromes nicht; der Strom wird lediglich in seiner Lage zur Netzzspannung verschoben. Die Phasenwinkel der Stromharmonischen variieren mit dem Zündwinkel und proportional zur Ordnungszahl, das heisst bereits kleine Änderungen des Zündwinkels verursachen bei den höheren Harmonischen grosse Phasenverschiebungen. Dies bringt mit sich, dass für die Summation der Ströme aus verschiedenen Umrichtern ein quadratisches Gesetz für die Harmonischen höherer Ordnung (n grösser als etwa 7 bis 11) angenommen werden kann.

Phasenanschnittgeräte: Hauptanwendungsgebiet sind stufenlose Helligkeitsregelungen, also ohmsche Lasten (Bild 8). Die Anwendung für Sanftanlauf, zum Beispiel von Wärmepumpen, ist ein Spezialfall, da diese Anwendungen meist nur kurzzeitig mit Phasenanschnitt betrieben werden. Phasenanschnitt für Heizzwecke ist in der Regel untersagt.

Auch hier ist prinzipiell eine Zerlegung in die einzelnen Frequenzkomponenten

- Bereits die Grundschwingung des Stromes weist eine Phasenverschiebung auf, das heisst es wird induktive Blindleistung (trotz ohmscher Last!) aufgenommen.
- Die Amplituden der Stromharmonischen nehmen mit zunehmender Frequenz ab, allerdings nur bei kleinen Zündwinkeln (angenähert mit $1/n$). Bei grossen Zündwinkeln nehmen sie nur sehr langsam ab.

Die Oberschwingungen vieler am Netz angeschlossener Geräte addieren sich wegen der stark streuenden Phasenwinkel bereits bei kleinen Ordnungszahlen meistens quadratisch.

Schwingungspaketsteuerung: Bei der Schwingungspaketsteuerung wird, innert einer gegebenen Periode von mehreren 100 ms bis zu einigen Sekunden, während einer ganzen Anzahl Netzperioden die Last angeschlossen und während der restlichen Zeit nicht. Dieses Verfahren ist besonders bei thermischen Geräten sinnvoll, da wegen der meist grossen thermischen Zeitkonstante (einige Sekunden bis Minuten) eine genügende Glättung der resultierenden Temperatur auftritt. Technisch wird der Schalter (Triac) von Bild 7 nicht periodisch innerhalb der Halbwelle (Phasenanschnitt) gezündet, sondern bleibt während einer ganzen Anzahl Perioden geschlossen. Trotzdem resultieren auch bei diesem Steuerungsverfahren Netstromverzerrungen, allerdings nicht im Sinne von Harmonischen, sondern im Sinne von pulsierenden Lasten oder Unterharmonischen (Sub-

mögliche). Sie ergibt jedoch derart unübersichtliche Ausdrücke, dass auf die Wiedergabe verzichtet wird. Als wichtigste Eigenschaften seien erwähnt:

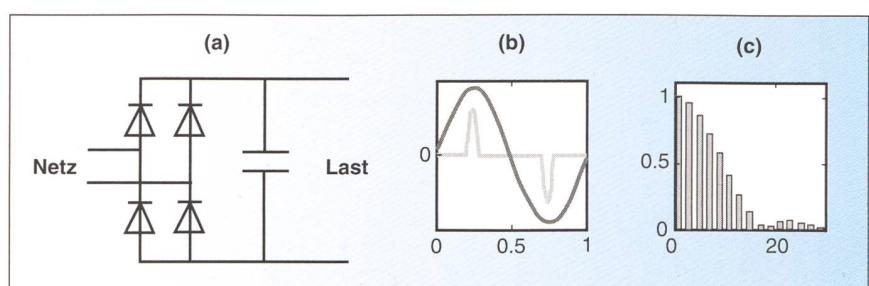


Bild 10 Einphasengleichrichter mit kapazitiver Glättung

a Prinzipschaltung b Stromverlauf über 50-Hz-Periode c Fourierspektrum des Stromverlaufs

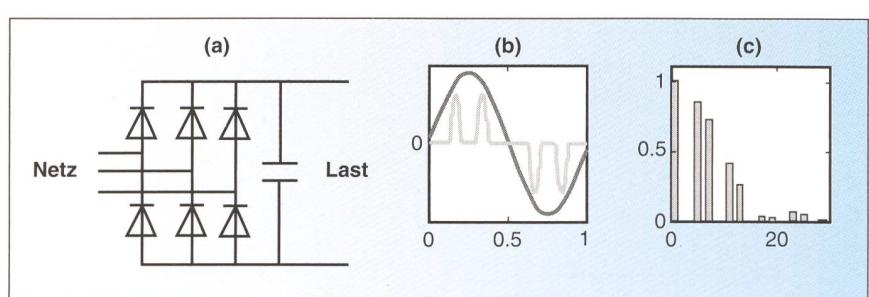


Bild 11 Dreiphasengleichrichter mit kapazitiver Glättung

a Prinzipschaltung b Stromverlauf über 50-Hz-Periode c Fourierspektrum des Stromverlaufs

harmonischen) mit einer Grundfrequenz entsprechend der Wiederholfrequenz des ganzen Zyklus (Summe aus Einschaltzeit und Ausschaltzeit). Damit werden solche Geräte in der Regel keine Harmonischen erzeugen, sondern Subharmonische, welche in erster Linie zu periodischen Spannungsschwankungen und damit zu Flicker führen können. Ein charakteristisches Beispiel für einen Zyklus von acht Perioden ist in Bild 9 dargestellt.

Einphasengleichrichter mit kapazitiver Glättung: Dies ist die übliche Schaltung für elektronische Geräte kleiner Leistung (Bild 10). Für den Strom ergibt sich folgende angenäherte Zerlegung:

$$i(t) = \sqrt{2} [I_1 \sin(\omega t) - I_3 \sin(3\omega t) + I_5 \sin(5\omega t) - I_7 \sin(7\omega t) + I_9 \sin(9\omega t) - \dots]$$

mit I_n proportional $\cos(n\pi/k)/[1-(n/k)^2]$ und mit n = Ordnungszahl und k = Halbperiode dividiert durch Stromleitzeit. Da es sich nicht um gesteuerte Gleichrichter handelt, führen alle am Netz angeschlossenen Geräte gleichzeitig Strom. Damit addieren sich die Stromkomponenten in jedem Polleiter weitgehend linear (zumindest für niedrige Ordnungszahlen, das heisst für n unter etwa 15). Die Kurvenform des Stromes sowie der Einsatz der Stromführung können in gewissen Grenzen durch die Grösse der Glättungskapazität sowie durch vorgeschaltete Induktivitäten verändert werden.

Im Dreiphasensystem mit gleichmässig verteilten derartigen Schaltungen führt der Neutralleiter die Summe der Ströme, deren Ordnungszahl durch drei teilbar ist (also $n = 3, 9, 15, \dots$). Dies führt zu zusätzlichen Spannungsabfällen und eventuell zu einer thermischen Überlastung des Neutralleiters.

Dreiphasengleichrichter mit kapazitiver Glättung: Diese Schaltung findet sich vor allem bei drehzahlgeregelten Antrieben höherer Leistung sowie bei unterbruchsfreien Speisungen (USV) für höhere Leistungen (Bild 11).

Für den Strom gilt folgende angenäherte Zerlegung:

$$i(t) = \sqrt{2}[I_1 \sin(\omega t) - I_5 \sin(5\omega t) + I_7 \sin(7\omega t) - I_{11} \sin(11\omega t) + I_{13} \sin(13\omega t) \dots]$$

Die Amplituden sowie die Superposition der einzelnen Harmonischen sind ähnlich wie beim vorher besprochenen Einweggleichrichter. Es treten keine Harmonischen auf, deren Ordnungszahl durch drei teilbar ist.

Interessant ist, dass gewisse Harmonische (z. B. 5 und 7) der dreiphasigen Schaltung mit kapazitiver Glättung entsprechende Harmonische der Einphasenschaltung

Ordnungszahl n	Zulässiger Strom (mA/W)	Maximal zulässiger Strom (A)
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13 und höher	3,85/n	siehe Tabelle 1 in IEC 555-2

Tabelle III Neue Grenzwerte für Stromemissionen von Massengeräten

Diese Werte gelten ab 1. Januar 1997 für alle derartigen Geräte mit folgenden Ausnahmen:

- Beleuchtungskörper mit einer Leistung <25 W: keine Grenzwerte bis 1998
- Geräte mit einer Leistung <75 W: keine Grenzwerte
- professionelle Geräte mit einer Leistung >1 kW: noch nicht bestimmt.

kompensieren können. Dies gilt jedoch nicht mehr streng bei der Superposition vieler verschiedener derartiger Gleichrichter mit verschiedenen Grössen der Glättungskapazität und eventuellen Vorschalt-drosseln/Netzimpedanzen. Es kann sogar der Fall auftreten, dass sich bei höheren Harmonischen die Vorzeichen kehren; das heisst anstatt einer Auslösung oder Reduktion kann eine Verstärkung auftreten. Es ist wahrscheinlich, dass die Erhöhung des Pegels der 7. Oberschwingung bei gleichzeitiger Reduktion der 5. Oberschwingung in Bild 5 auf diese Effekte zurückzuführen ist. Beide kapazitiven Kreise zusammen können im weiteren mit andern Schaltungen zu einer Vergrösserung oder Verkleinerung von bestimmten Oberschwingungen führen. Eine definitive Aussage ist somit nicht möglich; für die Normierungsarbeit muss vom schlimmsten Fall ausgegangen werden.

Relevante Normen

IEC 555-2: Disturbances caused by equipment connected to the public low-voltage system. Limits concerning harmonic currents for equipment having an input current up to and including 16 A per phase: Diese Norm begrenzt die Stromemissionen von «Massengeräten», das heisst von Geräten, welche für den allgemeinen Markt bestimmt sind. Für professionelle Geräte sind andere (höhere) Grenzwerte in Diskussion. Die Revision dieser Norm ist abgeschlossen.⁶ Als wichtigstes Novum ist der Einbezug von elektronischen Speisungen zu erwähnen, welche auf der Netzseite eine ungesteuerte Gleichrichterbrücke mit kapazitiver Glättung aufweisen. Es werden Grenzwerte nach Tabelle III für die Emissionen eingeführt. Die angegebenen Maximalwerte gelten für alle andern Geräte unabhängig von ihrer Nennleistung. Für Handwerkzeuge gelten 50% höhere Gren-

⁶ Dokument IEC 77A(Central Office)41, von IEC mit komfortabler Mehrheit angenommen; auch in Cenelec angenommen (mit doa: 1.10.94; dop [Publikation]: 1.7.95; dow [Ausserkraftsetzung widersprüchlicher Normen]: 1.1.97).

werte. Bei der Festlegung dieser Werte wurde, neben den Kompatibilitätspegeln, von einer «normierten» Netzimpedanz (Referenzimpedanz) ausgegangen, welche aufgrund von Untersuchungen in ganz Europa in 95% der Fälle nicht überschritten werden sollte. Die Werte dieser Impedanz sind in der Legende zu Bild 12 angegeben.

IEC 555-4: Zulässige Stromharmonische für Grossgeräte: Als Grossgeräte werden im Zusammenhang mit diesem Normentwurf Geräte bezeichnet, welche

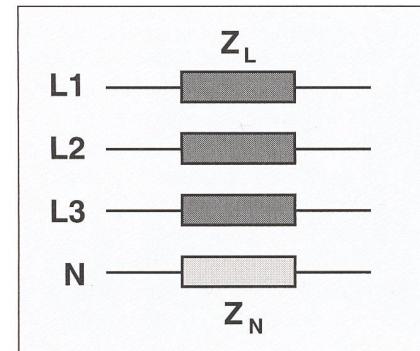


Bild 12 Konventionelle Netzimpedanz im Niederspannungsnetz

Werte bei 50 Hz: $Z_L = (0,26 + j 0,16) \Omega$, $Z_N = (0,14 + j 0,09) \Omega$, $Z_{LN} = (0,4 + j 0,25) \Omega$

mehr als 16 A und (wahrscheinlich) weniger als 75–100 A aufnehmen und für den Anschluss an das öffentliche Niederspannungsnetz vorgesehen sind. Ziel der Arbeiten ist es, eine Reihe von Empfehlungen über die Anschlussbedingungen zu erarbeiten, so dass der internationale Markt möglichst wenig durch lokale Vorschriften behindert wird. Die folgenden Aussagen entsprechen dem aktuellen Stand der Arbeiten (Mai 1994) und sind noch nicht definitiv.

Für freizügigen Anschluss überall im Netz sind zulässige Stromemissionen nach Tabelle IV vorgeschlagen. Geräte, welche diese Grenzwerte überschreiten, sind dann zulässig, wenn ein bestimmtes Verhältnis Gerätelastung $S_{equipment}$ zu Kurzschlussleistung S_{cc} am Anschlusspunkt nicht über-

Elektromagnetische Verträglichkeit

<i>n</i>	$I_n/I_1 (\%)$
3	21,6
5	10,7
7	7,2
9	3,8
11	3,1
13	2,0
15	0,7
17	1,2
19	1,1
21	0,3
23	0,9

Tabelle IV Emissionsgrenzen für freizügigen Anschluss von Grossgeräten

n Ordnungszahl der Harmonischen
I₁ Nennwert der Grundkomponente des Stromes ($>16 \text{ A}$)
I_n zulässige Emission von Stromoberschwingungen ($n > 1$)

Geräte, welche diese Grenzwerte überschreiten, sind dann zulässig, wenn ein bestimmtes Verhältnis Geräteleistung $S_{\text{equipment}}$ zu Kurzschlussleistung S_{cc} am Anschlusspunkt nicht überschritten wird.

schritten wird. Dieses Verhältnis ist zurzeit auch noch in Diskussion, wird aber Multiplikationsfaktoren für die angegebenen Grenzwerte enthalten, welche proportional zu $(S_{cc}/S_{\text{equipment}})^{1/2,5}$ sind. Sie werden gemäss dem aktuellen Stand des Vorschlags zusätzlich durch Grenzwerte für den Klirrfaktor bei bestimmten Schaltungen und Kurzschlussverhältnissen ergänzt.

Noch weitergehende Emissionen werden nicht mehr global, sondern von Fall zu Fall entschieden, wobei nicht mehr das einzelne Gerät eine Rolle spielen wird, sondern wahrscheinlich die gesamten Emissionen einer Kundenanlage. Bei der Festlegung dieser Grenzwerte wird nicht mehr von einer Normimpedanz wie in Bild 12 ausgegangen, sondern es wird die reale Netzimpedanz (charakterisiert durch die Kurzschlussleistung S_{cc} am Anschlusspunkt) zugrunde gelegt. Sie resultiert indirekt aus der Norm IEC 555-3 bzw. 555-5, welche einen maximalen Spannungsabfall von 3% pro Gerät erlaubt.

IEC 555-3 und IEC 555-5: Limits concerning voltage fluctuations and flicker: Diese Normen (555-3 für Geräte mit $<16 \text{ A}$ Netzstrom) bzw. Empfehlungen (555-5 für Geräte mit $>16 \text{ A}$ Netzstrom) betreffen nur in zwei speziellen Punkten Geräte der Leistungselektronik. Sie begrenzen nämlich den zulässigen Flickereindruck am Anschlusspunkt, welcher durch das Schalten dieser Geräte hervorgerufen wird. Das Flickerphänomen beschreibt eine Beeinträchtigung, welche nicht ausschliesslich durch elektrische Grössen beschrieben wird, sondern zusätzlich eine humanphysiologische (oder eher psychologische) Komponente enthält, da es eine Aussage über die Störung des Wohlbefindens liefern

soll. Breit angelegte Untersuchungen haben ergeben, dass die durch Helligkeitsänderungen hervorgerufene subjektive Störung von der Wiederholhäufigkeit und von der Dauer abhängt mit einem Maximum der Empfindlichkeit bei rund 16 Änderungen pro Sekunde. Die Grenzwerte, bei denen bei praktisch allen Versuchspersonen eine Beeinträchtigung auftritt (kritische Flickerdosis $P = 1$) sind in der Norm IEC 555-3 im Detail dargestellt. Man unterscheidet die kurzzeitige Flickerdosis P_{st} , welche mit dem Flickermeter⁷ über 10 min gemessen wird, und die Langzeitflickerdosis P_{L1} , welche über zwei Stunden hinweg aus P_{st} bestimmt wird gemäss

$$P_{L1} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{st,i}^3}{12}} \quad (2)$$

Im Flickermeter wird eine recht komplexe Umrechnung der Spannungsänderung in die Flickerdosis vorgenommen, wobei neben der Empfindlichkeitskurve (siehe Tabelle VI) auch berücksichtigt wird, dass die Helligkeit einer Glühlampe proportional zum Quadrat der Spannungsänderung verläuft.

Für eine rechteckförmige Variation des Effektivwerts der Spannung gibt die Tabelle V einige Anhaltspunkte für Kombinationen von Spannungsänderung d (in Pro-

<i>d</i>	<i>r</i>
3	0,76
2,5	1,36
2	2,79
1,5	7,04
1	26,6
0,7	110
0,5	475
0,3	1180
0,4	1620

Tabelle V Spannungsänderungen und Wiederholhäufigkeiten, welche zu einer Flickerdosis $P = 1$ führen

d Variation des Effektivwerts der Spannung (in % der Spannung)

r Wiederholfrequenz r (Änderungen pro Minute)

zent der Spannung) und Wiederholfrequenz r (Änderungen pro Minute), welche zu einer Flickerdosis $P = 1$ führen.

Neben dem Flickereindruck wird aber auch die stationäre Netzzspannungsänderung durch das Schalten dieser Geräte begrenzt. In der Regel gilt für alle Geräte, dass der dadurch hervorgerufene stationäre bezogene Spannungsabfall $\Delta u = \Delta U/U_N$ den Wert von 3% nicht überschreiten darf. Da-

⁷ Für eine genaue Beschreibung sei auf die Norm IEC 868 verwiesen.

mit begrenzen diese Normen aber indirekt auch die Netzimpedanz Z_s (bei 50 Hz), welche für den Anschluss von Geräten einer bestimmten Leistung noch zulässig ist, zu $Z_s \text{ zulässig} = 0,03 \text{ } U_N/I_N = 0,03 \text{ } U_N^2/S_N$. Sie liefern somit auch über die Festlegung der maximalen Netzimpedanz ein Mass für die möglichen Spannungsverzerrungen am Anschlusspunkt, welche durch Stromharmonische hervorgerufen werden.

SN 413600: Die Schweizer Norm: In der Schweiz wurde bereits recht früh eine nationale Norm unter der Federführung von Prof. Zwicky erarbeitet, welche unter anderem die Emissionen von Geräten der Leistungselektronik begrenzt. Sie ist unter der Bezeichnung SEV 3600 «Begrenzung von Beeinflussungen in Stromversorgungsnet-

Ungeradzahlige Oberschwingungen		Geradzahlige Oberschwingungen	
<i>n</i>	<i>u_n (%)</i>	<i>n</i>	<i>u_n (%)</i>
3	0,85	2	0,3
5	0,65	4–40	0,2
7	0,60		
9, 11	0,40		
13	0,30		
15–39	0,25		

Tabelle VI Zulässige Oberschwingungsbeiträge von Geräten und Anlagen, bezogen auf die Nennspannung

n Ordnungszahl der Harmonischen
u_n maximal zulässige Oberschwingungsbeiträge durch eine zusätzliche Last, in Prozent der Nennspannung; nach SN 3600

zen» in zwei Teilen (Bestimmungen sowie Erläuterungen und Berechnungen) am 1. November 1987 in Kraft gesetzt worden. Sie verfolgt eine grundlegend andere Philosophie als die andern nationalen Normen zu diesem Gebiet, indem sie vorschreibt, wie gross die maximal zulässige *individuelle Spannungsverzerrung* durch eine zusätzliche Last sein darf. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle VI wiedergegeben.

Es sei nicht verschwiegen, dass diese Philosophie derzeit in Frage gestellt wird, da sie keine Rücksicht auf die aktuelle Situation des Netzes nimmt. Im Extremfall kann es vorkommen, dass ein Verbraucher, welcher allein an einem Niederspannungspunkt angeschlossen ist, trotzdem nicht über den ganzen, möglichen Anteil an Spannungsverzerrung verfügen kann, sondern nur über den Anteil gemäss obiger Tabelle. Eine Revision ist in Diskussion; wahrscheinlich wird aber die ganze Norm ersetzt durch die entsprechenden IEC- bzw. Cenelec-Normen oder -Empfehlungen bzw. den nachfolgend aufgeführten «Leitfaden».

Für den Flicker sind die Grenzwerte der Schweizer Norm identisch mit jenen der IEC-Normen 555-3 und 555-5.

Spannungswert	Nennspannung bzw. 240/400V, $\pm 2\%$
Zulässige Verzerrung	$\hat{u} = (1,40-1,42)U_{eff}$ erreicht zwischen 87 und 93 Grad nach Nulldurchgang
Dreiphasen-Symmetrie	Winkel zwischen je 2 Phasen 120 Grad $\pm 1,5$ Grad
Frequenz	Nennfrequenz $\pm 0,5\%$

Tabelle VII Anforderungen an das Speisenetz bei Emissionsmessungen

Maximal erlaubte Abweichungen der Kurvenform der Netzzspannung (bei angeschaltetem Prüfling) von der idealen Sinusform; nach Norm IEC 555-2.

Leitfaden «Netzrückwirkungen» der deutschsprachigen EVU-Verbände: Wie in der Schweiz existieren auch in den Nachbarländern lokale Vorschriften, welche die Emissionen von Geräten und Anlagen begrenzen, soweit sie nicht durch internationale Normen geregelt sind. Sie sind von Land zu Land leicht verschieden, obwohl eigentlich die zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten die gleichen sind. Sprachregional haben sich seit vielen Jahren Vertreter von Deutschland, Österreich und der Schweiz zu einer Arbeitsgruppe zusammengetan, um für ähnliche Probleme auch ähnliche Lösungen zu finden.

Eine dieser Arbeitsgruppen ist derzeit daran, einen länderübergreifenden harmonisierten Entwurf für eine erste Abschätzung der Zulässigkeit von Emissionen zu entwerfen. Bei diesem Entwurf geht es sinnvollerweise darum, nicht die Werte für einzelne Geräte zu begrenzen (dies ist die Domäne von IEC und Cenelec), sondern für ganze *Kundenanlagen*, welche ja immer einen Mix von verschiedenen Gerätetypen darstellen.

Für die Bewertung wird auf das Verhältnis zwischen der vom Kunden bestellten Anlageleistung S_A (oder Geräteleistung S_r) und der Nennleistung (Transformatorleistung S_{rT}) oder Kurzschlussleistung S_{KV} am Verknüpfungspunkt abgestellt. Es kann und darf hier nicht im Detail darauf eingegangen werden, da diese Überlegungen erst im Vorschlagsstadium sind. Grob ist folgendes vorgesehen: In Hinsicht auf die Spannungsschwankungen (und damit Flickererscheinungen) werden für die ver-

schiedenen Anlagetypen Minimalverhältnisse für S_{KV}/S_r angegeben, welche zwischen 30 und 250 für Dreiphasenlasten liegen. Für Oberschwingungen (OS) werden die Geräte in drei Klassen unterteilt, je nach dem Klirrfaktor des Netzstromes und der gegenseitigen Phasenlage der Oberschwingungen. Die gesamte Oberschwingungsleistung S_{OS} (zu verstehen als Leistung von OS-erzeugenden Anlagenteilen) folgt dann aus einer je nach Gerätetyp gewichteten Summation der Einzelleistungen. Aus der Netzkonfiguration lässt sich andererseits eine zulässige Oberschwingungsleistung $S_{OS,zul}$ berechnen.⁸ Ist die Oberschwingungsleistung der Anlage kleiner als die so berechnete zulässige Leistung, so kann die Anlage in der Regel bewilligt werden. Andernfalls sind spezielle Auflagen zu vereinbaren.

Auch für höhere Frequenzen und Interharmonische enthält der Leitfaden Hinweise für die Behandlung der Anlagen und Anlagenteile.

Emissionsmessung: Jede Norm ist natürlich nur brauchbar, wenn ihre Überprüfung gewährleistet ist. Rechtsstaatliche Gründe und technische Überlegungen erfordern, dass diese Überprüfung reproduzierbar ist und unabhängig von der überprüfenden Stelle die gleichen Ergebnisse liefert. Aus diesem Grunde sind in den aufgeführten Normen auch Prüfvorschriften für Geräte und Gerätegruppen aufgeführt (womit sie im Prinzip auf Product Standards vorgreifen).

⁸ Formel: $S_{OS,zul}/S_A = 0,2 (S_A/S_{rT})^{-1/2,5}$

Anforderungen an das Speisenetz: Die verschiedenen oben angeführten prinzipiellen netzseitigen Schaltungen hängen mehr oder weniger stark von der Kurvenform der Spannung des speisenden Netzes ab. Deshalb müssen gewisse Mindestanforderungen an dieses Netz gestellt werden. Sie sind (für Massengeräte) in der Norm IEC 555-2 angeführt. Gemäß dieser Norm darf die Speisespannung *unter Last*, das heisst mit angeschaltetem Prüfling, maximal Abweichungen von der idealen Sinusform nach Tabelle VII aufweisen.

Unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Verzerrung dürfen einzelne Harmonische der Spannung Werte nach Tabelle VIII nicht überschreiten.

Diese Vorschriften begrenzen in rechter Weise die zulässigen Nichtidealitä-

n	u_n (%)
3	0,9
5	0,4
7	0,3
9	0,2
≥ 11	0,1
gerade 2–10	0,2

Tabelle VIII Detailangaben zu Tabelle VII

Maximal zulässige Werte für Spannungs-harmonische u_n in Prozent der Grundschwingung.

ten der Speisespannung; das öffentliche Netz ist (wie schon aus Bild 5 hervorgeht) für Emissionsmessungen von Geräten im allgemeinen nicht mehr brauchbar. Es müssen damit Sonernetze (spezielle Leistungsverstärker, Seriekompatoren zum öffentlichen Netz) realisiert werden. Dies ist insbesondere bei hohen Leistungen ein Problem.

Für die eigentlichen Messgerätespezifikationen sind in IEC 1000-4-7 detaillierte Angaben enthalten.

Spezifische Gerätevorschriften: Für gewisse Geräte sind in der Norm 555-2 detaillierte Vorschriften für die Einstellungen und Betriebsbedingungen beim Emissions-test enthalten. Diese Norm ist damit ein Zwischenstand zwischen einem Basic Standard, einem Generic Standard und einem Product Family Standard. Für die Details muss auf die entsprechenden Anhänge zu dieser Norm verwiesen werden.

Emissionsreduktion

Für die Reduktion und Begrenzung der Spannungsverzerrung können passive oder aktive Verfahren angewendet werden.

Passive Emissionsreduktion

Passive Verfahren beruhen darauf, dass für eine oder mehrere Stromharmonische

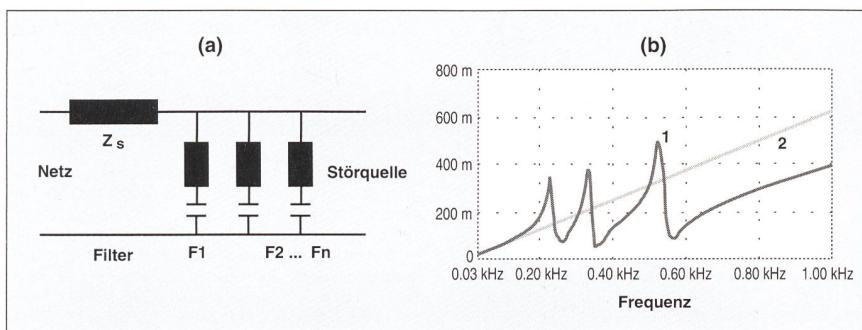


Bild 13 Konventionelles passives Filter, abgestimmt für 250, 350 und 550 Hz
a Schema b Frequenzgang der Impedanz mit (1) und ohne (2) Filter

Elektromagnetische Verträglichkeit

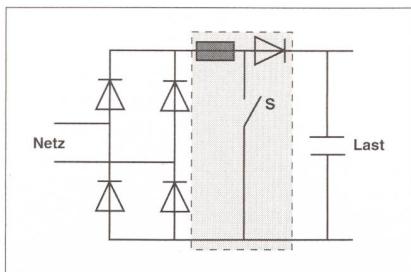


Bild 14 Einfügung eines Hochsetzstellers zur Erzeugung eines nahezu sinusförmigen Netzstromes

ein sehr niederohmiger Parallelpfad eingefügt wird, so dass diese Stromkomponenten nicht mehr über die Netzinduktivität abfließen und dort Spannungsabfälle hervorrufen. Diese Parallelpfade werden meist durch Serieschwingkreise realisiert, deren Resonanzfrequenz (und damit Punkt kleinsten Impedanz) auf die Frequenz der zu unterdrückenden Harmonischen abgestimmt ist (siehe Bild 13). Diese Schwingkreise weisen allerdings immer auch, im Zusammenspiel mit der Netzinduktivität, eine Parallelresonanz mit hoher Impedanz auf. Ganz unproblematisch ist der Einsatz solcher Filter nicht:

- Sie nehmen nicht nur die Stromkomponenten von der Last auf, sondern auch von bereits vorhandenen Spannungsharmonischen im Netz, so dass eine Überlastung nicht ausgeschlossen werden kann.
- Für Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz (und damit für die Netzfrequenz) ist die Impedanz auf jeden Fall kapazitiv. Die Beherrschung der Stabilität des Netzes kann damit in Frage gestellt sein. Aus diesem Grund ist in einigen Ländern der unkontrollierte Einsatz von passiven Filtern nicht gestattet.

Bei Einphasengleichrichter-Schaltungen gemäss Bild 10 kann die Einfügung einer relativ grossen Induktivität in die Netz-

zuleitung die Leitdauer vergrössern und damit die Stromharmonischen verkleinern. Allerdings ist diese Induktivität relativ gross (Größenordnung: 1 H·W, das heisst 10 mH für 100 W) und bringt zusätzliche Verluste.

Aktive Emissionsreduktion

Aktive Emissionsreduktion bedingt spezielle Eingangskreise. Einphasenlasten werden, wie in Bild 14 angegeben, mit einem zusätzlichen Kreis (Hochsetzsteller im gestrichelten Rahmen) versehen. Damit kann erreicht werden, dass auch schon bei Netzspannungen, welche kleiner sind als die Kondensatorspannung auf der Lastseite, im Eingangskreis Strom fliesst. Für die Ansteuerung des Schalters sind spezielle ICs erhältlich, welche den Schalter bei relativ hohen Taktfrequenzen (meist grösser als 10 kHz) ansteuern und einen nahezu sinusförmigen Strom im Netz erzwingen (Verlauf prinzipiell ähnlich wie in Bild 15).

Für höhere Leistungen (und damit meist Dreiphasenanwendungen) werden abschaltbare Leistungshalbleiter am Eingang verwendet, deren Leitdauer innerhalb der Netzperiode moduliert wird (sog. Pulsbreitenmodulation, pulse width modulation, PWM). Je nach Leistung können Feldeffekttransistoren, Bipolartransistoren (insbesondere IGBT) oder aber abschaltbare Thyristoren (Gate Turn-Off Thyristors, GTO) zum Einsatz kommen. Das Prinzip der Schaltung ist für eine einphasige Anwendung in Bild 15 dargestellt. Für dreiphasige Anwendungen muss lediglich ein drittes Schalterpaar für die dritte Netzzuleitung eingefügt werden.

Durch eine ausgeklügelte Modulation der Leitdauer der einzelnen Schalter wird eine pulsierende Spannung (Amplitude = Kondensatorspannung) am Eingang des Systems erzeugt. Die Amplitude und die Phasenlage der 50-Hz-Komponente dieser Spannung werden so eingestellt, dass die

benötigte Wirkleistung übertragen wird. Zusätzlich kann auch noch beliebig Blindleistung erzeugt oder aufgenommen werden.

Die Oberschwingungen dieser pulsförmigen Spannung erzeugen Oberschwingungs-Stromkomponenten, welche durch die vorgeschaltete Induktivität begrenzt werden. Bei hohen Schaltfrequenzen sind diese Stromkomponenten häufig vernachlässigbar klein, das heisst, der Eingangstrom ist praktisch rein sinusförmig⁹.

Bei vorhandenen Anlagen (und damit definiertem, verzerrtem Netzstrom) kann noch ein anderer Weg beschritten werden (siehe Bild 16). Parallel zum vorhandenen netzseitigen Umrichter (Last) wird ein kleiner Hilfsumrichter (Kompensator, ungefähr 10% der Leistung von Last) geschaltet, welcher lediglich die Aufgabe hat, die von der Sinusform abweichenden Komponenten des Umrichterstromes zu erzeugen oder zu absorbieren. Da es sich um Oberschwingungen handelt, wird im Mittel keine Wirkleistung umgesetzt, was die kleine Bauleistung erklärt. Derartige Oberschwingungskompensatoren werden zurzeit intensiv untersucht. Sie können auch so ausgelegt werden, dass sie gleichzeitig den grundfrequenten Blindstrom der Last kompensieren.

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

- Leistungselektronik ist unverzichtbar, aber «störfreudig»; diese Störaussendung muss begrenzt werden.
- Geräte und Anlagen müssen elektromagnetisch verträglich sein, das heisst sie dürfen weder andere stören noch ihre Funktionsfähigkeit unter Störeinfluss einbüßen.
- Normen sind ein gutes Mittel zur Sicherstellung der elektromagnetischen Verträglichkeit; sie geben international vereinbarte und verbindliche Grenzwerte an.
- Normen sind, wie die Technik selbst, einem steten Wandel unterworfen und meistens nicht voraussehend.

Der scheinbar unübersehbare Harst von Niederfrequenznormen besteht in Realität

⁹ Er ist es aber nicht vollständig, das heisst es werden störende Stromkomponenten ins Netz emittiert. Bei den heute üblichen Schaltfrequenzen von mehr als 1 kHz ist deren Einfluss nicht genau bekannt, da noch zu wenig derartige Geräte in Betrieb sind. In IEC 1000-2-1 wird zumindest festgehalten, dass sich die Stromemissionen dieser Geräte kaum summieren werden. Welche Spannungsverzerrungen sie aber am nächstliegenden gemeinsamen Anschlusspunkt (PCC, Point of Common Coupling) hervorrufen dürfen, ist derzeit noch nicht geregelt. Fest steht lediglich, dass sie Rundsteuerungen nicht beeinflussen dürfen.

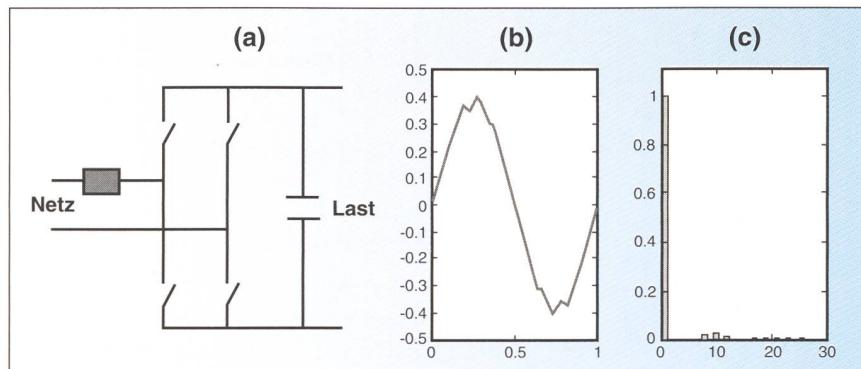


Bild 15 PWM-Eingangskreis

a Schaltung (einphasig) b Stromverlauf

c Fourierspektrum des Stromes bei (unrealistisch) niedriger Taktfrequenz

nur aus einigen wenigen Vorschriftenwerken, welche ein generelles Ziel anstreben: *Gewährleistung einer gesicherten Versorgung mit elektrischer Energie einer genügenden Qualität*. Die Normen mögen, im Einzelfall, bei der Herstellung eines Produktes als hinderlich oder, noch schlimmer, als kostenverursachend erscheinen. Sie sind

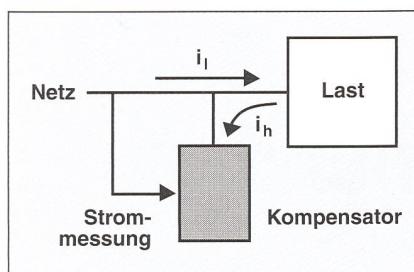


Bild 16 Prinzip der aktiven Kompensation

i_h harmonische Ströme
 i_L Grundschwingungsstrom (Nutzstrom)

aber eine Gewähr dafür, dass jenseits von partikulären Interessenlagen auch die Interessen der Allgemeinheit gewahrt bleiben und dass für alle Anbieter gleiche Konkurrenzbedingungen herrschen.

Anhang

EN 50160 (1994): Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems

Die hier noch beigelegte Norm ist keine Emissions- oder Immissionsnorm, sondern eine neue Regelung betreffend die Qualität der elektrischen Energie. Sie ist aber im Zusammenhang mit den eigentlichen EMV-Normen von Interesse.

Vorgeschichte

Im Rahmen der Liberalisierungsbestrebungen der EU wird elektrische Energie als ein Produkt wie viele andere betrachtet, so dass eine Produktnorm notwendig wird, in welcher die relevanten Eigenschaften beschrieben sind und die Grenzwerte für die Abweichungen von den Nenndaten fixiert werden.¹⁰ Diese Umschreibung wird vorgenommen, obschon bekannt ist, dass Elektrizität das wohl einzige Produkt ist, dessen Eigenschaften weitgehend allein durch die Kunden bzw. Verbraucher negativ beeinflusst werden. Die Norm betrifft sowohl öffentliche Niederspannungsnetze (Nennspannung 230/400 V) wie auch Mittelspannungsnetze (Nennspannung bis 35 kV). Mit Rücksicht auf das Produkthaftpflichtgesetz, in welchem die Elektrizität explizit als Pro-

dukt aufgeführt ist, gewinnt allerdings diese Norm eine vollständig neue Bedeutung.

Daten

Die wichtigsten Daten für das Niederspannungsnetz unter normalen Betriebsbedingungen sind:

Netzfrequenz: $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ während 95% einer Beobachtungszeit von einer Woche, maximal $+4/-6\%$ während 100% einer Woche.

Netzspannung: Nennspannung $\pm 10\%$, gemessen als 10-Minuten-Effektivwert, während 95% einer Woche (evtl. Grenzwerte sind nicht bestimmt).

(Schnelle) **Spannungsschwankungen:** Meist kleiner als 5%, unter besonderen Umständen auch 10%; Flickerintensität $P_{LT} = 1$.

Spannungseinbrüche: Definiert als Absenkungen unterhalb 90% der Nennspannung bis zu ungefähr 1% der Nennspannung während weniger als 3 Minuten (meistens Absenkung auf weniger als 40% während weniger als 1 Sekunde). Man muss je nach Netz mit bis zu 1000 derartigen kurzzeitigen Spannungseinbrüchen rechnen.

Kurze Versorgungsunterbrechungen: Absenkungen bis nahe 0% (physikalisch gesehen: Schalteröffnung) und mit einer Dauer von meistens <1 Sekunde (maximale Dauer <3 Minuten) treten einige zehn bis einige hundert Male im Jahre auf.

Lange Versorgungsunterbrechungen: Es muss mit 10 bis 30 ungeplanten Unterbrüchen mit einer Dauer von über 3 Minuten gerechnet werden.

Überspannungen: Netzfrequente Überspannungen können vereinzelt während Schaltoperationen oder bei Erdschlüssen

aufreten, übersteigen aber in der Regel 1,5 kV nicht. Transiente (nicht netzfrequente) Überspannungen mit Anstiegszeiten unterhalb von Millisekunden überschreiten in der Regel 6 kV nicht; ihr Energieinhalt kann stark variieren.

Spannungsunsymmetrie: Jeder 10-Minuten-Effektivwert der Gegenkomponente weist während 95% des Wochenintervales in der Regel einen Wert auf, der kleiner ist als 2% der Mitkomponente.

Oberschwingungen: Die 10-Minuten-Effektivwerte der Spannungsoberschwingungen der ersten 25 Harmonischen überschreiten in der Regel während 95% der Zeit eines Wochenintervales die Kompatibilitätspegel gemäß IEC 1000-2-2 nicht (die Komponenten oberhalb der Ordnungszahl 25 sind nicht definiert). Der gesamte Klirrfaktor erreicht unter Berücksichtigung der ersten 40 Harmonischen maximal den Wert von 8%. Individuelle 10-Minuten-Effektivwerte können bis zum 1,5fachen dieser Werte gehen.

Zwischenharmonische Spannungen: Sie sind generell wesentlich kleiner als die benachbarten Oberschwingungen. Der Wert ist auf jeden Fall unterhalb 0,5%.

Signalspannungen auf der Versorgungsspannung: Für die 3-Sekunden-Effektivwerte sind für 95% des Wochenintervales Grenzwerte vorgeschlagen, angegeben in Prozent der Nennspannung (9% für 100 bis 500 Hz, 5% für 900 Hz bis 9 kHz, noch 1,1% bei 95 kHz (die nichtkonstanten Bereiche sinken linear in einer doppeltlogarithmischen Darstellung).

Mittelspannungsnetz

Im Mittelspannungsnetz gelten ähnliche Gesichtspunkte mit allerdings leicht verschiedenen Zahlenwerten.

Le respect des normes EMC est primordial pour l'industrie suisse

Vue d'ensemble des normes internationales EMC basse fréquence

Tous les appareils (y inclus les systèmes de l'électronique de puissance comme p. ex. les alimentations d'appareils électroniques) destinés au libre-échange doivent répondre à un minimum de conditions regardant la sécurité et la compatibilité électromagnétique. Dans le but d'une harmonisation des prescriptions y relatives et d'une réduction des problèmes non tarifaires liés au libre-échange, la Commission de l'UE a issu une directive sur la compatibilité électromagnétique, directive concrétisée par un nombre de normes internationales déjà en vigueur ou en voie d'achèvement. La connaissance et le respect de ces normes est d'une importance vitale pour l'industrie suisse axée en grande partie sur le marché international. Du grand éventail des normes sur la compatibilité électromagnétique, l'article présente les normes actuellement en vigueur ainsi que les développements prévisibles dans le domaine basse fréquence.

¹⁰ Diese Norm wurde Ende März 1994 angenommen; sie wird voraussichtlich ab Mitte 1995 in Kraft gesetzt.