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: 73 (1982)

Heft: 1

Artikel: Zulässiger Pegel der Oberschwingungsspannungen in Niederspannungs- und Mittelspannungsnetzen

Autor: [s.n.]

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904906

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: 09.07.2025

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

Zulässiger Pegel der Oberschwingungsspannungen in Niederspannungs- und Mittelspannungsnetzen

Vorschlag der SEV-Kommission zum Studium niederfrequenter Störeinflüsse

621.3.027.24;

Die 50-Hz-Netzspannung wird durch Effekte verschiedenster Art, wie Spannungsschwankungen (Flicker), Spannungseinbrüche, Kurzunterbrechungen, «spikes», Oberschwingungen usw., «verseucht». Der ganze Fragenkomplex der Netzspannungsqualität stösst heute auf zunehmende Beachtung. Die nicht direkt an 50 Hz gebundenen Probleme werden in der Schweiz von der Studienkommission für niederfrequente Einflüsse des SEV (Stuko NF) betreut, die die Angelegenheiten des IEC-TC 77 behandelt. Es gilt insbesondere, gefährlichen zukünftigen Entwicklungen vorzubeugen. Der vorliegende Bericht betrifft eines der wichtigsten Probleme auf dem Gebiet der Oberschwingungen: die Festlegung von in den öffentlichen Elektrizitätsnetzen zulässigen Oberschwingungsspannungen.

L'onde de tension 50 Hz du réseau subit des perturbations de différentes sortes comme les fluctuations de tension (flicker), les creux de tension, les microcoupures, les harmoniques. La question de la qualité de la tension soulève un intérêt croissant. Les problèmes qui ne sont pas en relation directe avec la fréquence fondamentale sont étudiés en Suisse par la «Commission pour l'étude des perturbations à basse fréquence» de l'ASE qui traite aussi des affaires relatives au Comité 77 de la CEI. Le rapport ci-dessous concerne l'un des problèmes les plus importants dans le domaine des harmoniques: fixer les tensions harmoniques admissibles dans les réseaux de distribution[1]).

1. Ziel und Gliederung des Berichtes

Ziel des Berichtes ist es, einen Vorschlag zur Festlegung von zulässigen Oberschwingungs-(OS-)Spannungen in den Niederspannungs-(NS)- und Mittelspannungs-(MS)-Netzen zu unterbreiten und die Grundlagen zu diesem Vorschlag zu erläutern. Eine solche Festlegung ist notwendig, um ein gleichzeitiges störungsfreies Funktionieren von OS-erzeugenden und OS-empfindlichen Betriebsmitteln in ihrer gemeinsamen Umwelt, den Elektrizitätsnetzen, zu ermöglichen.

Zuerst werden die Zielsetzungen für die Betroffenen (Beeinflussende, Beeinflusste, Elektrizitätsnetze) und anschliessend die zu beachtenden Einflussfaktoren behandelt. Der Vorschlag wird in Kapitel 4 in der Form von drei Frequenzspektren vorgelegt. Zulässige OS-Spannungsgrenzen müssen praxisgerecht sein. Dementsprechend wird in Kapitel 5 geprüft, ob der Vorschlag mit den von den OS-Erzeugern verursachten und in den Netzen auftretenden OS-Spannungen koordiniert ist; es wird auch geprüft, ob eine genügende Reserve für eine gewisse Anzahl von neuen zukünftigen Beeinflussenden vorhanden ist. Darnach wird das Problem von der Seite der Beeinflussten her betrachtet, und es wird untersucht, ob ihr Immunitätsniveau mit den in Betracht gezogenen Grenzwerten im Einklang steht.

Der Vorschlag soll als Grundlage für eine später zu erarbeitende SEV-Norm dienen. In der Zwischenzeit sollte er als Richtlinie angewendet werden, um Erfahrungen zu sammeln und dessen Zweckmässigkeit zu überprüfen.

Im vorliegenden Bericht werden nur stationäre bzw. quasistationäre Zustände von Oberschwingungen betrachtet. Es wird vorausgesetzt, dass die Vorgänge bei der Entstehung der OS-Spannungen bekannt sind. Messprobleme werden nicht behandelt.

2. Zielsetzung

Da die in Elektrizitätsnetzen angeschlossenen, auf Oberschwingungen empfindlichen Geräte durch die an ihren Klemmen auftretenden OS-Spannungen beeinflusst werden, eignet sich als Beeinflussungskriterium ein Spektrum der zulässigen OS-Spannungen.

Dieses zulässige Spektrum ist für die NS- und die MS-/HS-Netze etwas verschieden. Es stellt eine technische Grundlage dar, welche bei den drei Beteiligten (Beeinflusste, Beeinflussende, gemeinsames Elektrizitätsnetz) verschiedene Zwecke erfüllen soll:

– Den Herstellern von durch Oberschwingungen beeinflussten Geräten, den *Beeinflussten*, soll sie diejenigen Grenzwerte angeben, welchen deren Geräte mindestens standhalten müssen bzw. oberhalb welchen die Immunitätsgrenze dieser Geräte unter Berücksichtigung einer Sicherheitsspanne zu legen ist.

– Den Herstellern von Oberschwingungen verursachenden Geräten, den *Beeinflussenden*, soll sie angeben, welche Gesamt-OS-Spannung einzuhalten ist. Dabei darf jedes Gerät in der Regel nur einen Anteil dazu beisteuern; in diesem Sinne hat das Gesamtspektrum eher informativen Charakter, als Grundlage für noch aufzustellende Vorschriften, die jede Geräteart direkt betreffen werden.

– Den *Elektrizitätswerken* soll sie die Grenzen der resultierenden OS-Spannungen angeben, die durch die Superposition der einzelnen OS-Quellen entstehen und die unter normalen Umständen nicht überschritten werden dürfen.

Entsprechend wird sie in allen mit OS-Beeinflussungsproblemen zusammenhängenden Fällen, insbesondere in Störungsfällen, eine Entscheidungsgrundlage zwischen Beeinflussten, Beeinflussenden und Elektrizitätswerken bilden.

Bei der Behandlung des Problems erscheint es sinnvoll, ein volkswirtschaftliches Gesamtoptimum zwischen den Aufwendungen der drei Beteiligten anzustreben. Die Grenzwerte sind deshalb so anzusetzen, dass sie sowohl auf der Seite der Beeinflussenden als auch bei den Beeinflussten den überwiegenden Teil der Geräte und Anschlusspunkte erfassen, jedoch vereinzelte Sonderfälle nicht unbedingt berücksichtigen. In derartigen Sonderfällen ist es zumutbar, Spezialmassnahmen vorzusehen.

3. Zu beachtende Faktoren

3.1 Aufgrund ihres Entstehungsvorganges müssen bei den Oberschwingungen drei Gruppen unterschieden werden, für die auch je ein separates Spektrum aufzuzeichnen ist:

– *Ungeradzahlige Oberschwingungen, die nicht ein Vielfaches von 3 sind.* Es sind dies die Oberschwingungen (5., 7., 11., 13., ...), die durch nichtlineare Generatoren und Verbraucher normalerweise erzeugt werden. Sie bilden im Netz dreiphasige Mit- und Gegensysteme.

– *Ungeradzahlige Oberschwingungen, die ein Vielfaches von 3 sind.* Diese Oberschwingungen (3., 9., 15., ...) sind homopolar

[1]) La version française de cet article sera publiée dans un numéro ultérieur du Bulletin.

und treten in der Regel nur in NS-Netzen mit Nulleiter auf, möglicherweise in starr geerdeten MS-/HS-Netzen. In den Fällen, in denen die drei OS-Phasenspannungen (bzw. die drei OS-Ströme) im NS-Netz unsymmetrisch sind, kann ein Differenz-Spannungsanteil in das Mittel- und Hochspannungsnetz übertreten.

– *Geradzahlige Oberschwingungen* (2., 4., 6., ...). Diese treten durch Verbraucher mit unsymmetrischen Stromkurven auf, wie z. B. durch kleine einpulsige Gleichrichter, Fernsehgeräte usw. oder durch Geräte mit halbgesteuerten Drehstrom-Brückenschaltungen (die aber aufgrund von VSE-Empfehlungen nur mit kleiner Leistung zugelassen sind).

3.2 Bei der Festlegung zulässiger OS-Spannungen muss man, um alle sich stellenden Fragen und sich ergebenden Auswirkungen zu berücksichtigen, die Problematik sowohl von der Seite der Beeinflussenden als auch von der Seite der Beeinflussten angehen:

Aus der Sicht der *Beeinflussenden,* d.h. der OS-Erzeuger, müssen die festzulegenden Grenzwerte mit der Entstehung der OS-Spannungen im Netz im Einklang stehen, sonst läuft man Gefahr, dass sie nicht eingehalten und angewendet werden können. Man geht zweckmässigerweise von dem für jede Frequenz im Lauf der Zeit ohne besondere Massnahmen im Netz entstandenen, aufgrund einer langen Beobachtungsperiode (Registrierungen) festgestellten OS-Pegel aus. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die OS-Pegel sowohl zeitlich wie örtlich stark variieren und gemäss einer geographisch und zeitlich statistischen Häufigkeitsverteilung auftreten.

Im Sinne der erwähnten Gesamtoptimierung sollen vereinzelt vorkommende Maximalwerte als nicht zulässige OS-Pegel zugrunde gelegt werden. Es werden also etwas kleinere Grenzwerte festgelegt, deren Überschreitungswahrscheinlichkeit noch tragbar ist. Zwar sind schon zahlreiche OS-Spannungsmessungen durchgeführt worden, es sind jedoch fast keine Häufigkeitsverteilungen bekannt, und es sind keine Wahrscheinlichkeitskriterien für die Bestimmung der Grenzwerte festgelegt worden. Es mussten also aufgrund der vorhandenen Messungen vernünftige Annahmen getroffen werden (Kap. 5).

Mit Rücksicht auf eine allgemeine Erhöhung der OS-Spannungen durch die weitere Verbreitung der Leistungselektronik in den NS- und MS-Netzen der Zukunft und mit Rücksicht auf lokale Resonanzen muss eine angemessene Reserve vorgesehen werden.

Es ist auch darauf zu achten, dass der Aufwand für die gegebenenfalls notwendigen Massnahmen zur Reduktion der OS-Spannungen (Filter usw.) in tragbarem Rahmen bleibt.

Aus der Sicht der *Beeinflussten*, d.h. von allfällig Gestörten her, sind OS-Pegel in Betracht zu ziehen, denen die beeinflussten Geräte mit tragbarem Aufwand standhalten können. Je nach dem betrachteten beeinflussten Gerät muss zwischen Dauer- und Kurzzeiteffekten unterschieden werden. Bei Dauereffekten, z. B. thermischen Auswirkungen bei Motoren und Kondensatoren, muss man über eine gewisse Periode gemittelte Werte (Effektivwerte) betrachten (einige min bis 1 h). Bei Kurzzeiteffekten, z. B. bei elektronischen Steuerungen und Rundsteuerempfängern, sind die kurzzeitigen Höchstwerte (Momentanwerte) zu berücksichtigen. Ferner ist zu beachten, dass die OS-Spannungen im Laufe der Zeit sehr oft neben dem stationären oder quasi-stationären Verlauf auch kurzzeitige Spitzen (spikes) aufweisen.

Es muss auch unterschieden werden zwischen Fällen, wo nur eine Oberschwingung (z. B. bei Kondensatoren bei ausgeprägten Resonanzen) bzw. nur einige wenige Oberschwingungen (z. B. bei den Rundsteuerempfängern, bei Motoren) wirksam sind, im Gegensatz zu Fällen, wo sich die Gesamtheit der Oberschwingungen auswirkt (z. B. bei den Kondensatoren).

3.3 Es stellt sich auch die Frage, ob für NS-Verteilnetze und für MS-Netze die gleichen Grenzwerte gelten sollen. Es ist dabei zu beachten, dass sich die OS-Spannungen im NS-Netz aus dem lokal erzeugten Anteil und dem von der MS übertragenen Anteil zusammensetzen. Die OS-Spannungswerte auf der MS-Ebene liegen im Prinzip tiefer als auf der NS-Ebene, was durch Beobachtung bestätigt wird. In Schweizer Netzen betragen die MS-OS-Pegel durchschnittlich nur etwa 60 bis 80 % der entsprechenden NS-Pegel.

Zulässige Oberschwingungs-Spannungspegel in Niederspannungsnetzen in Prozenten der Nennspannung Tabelle I

Rangordnung der OS (ν)	Frequenz (Hz)	Ungeradzahlige OS, nicht Vielfache von 3 P–0 oder P–P	Ungeradzahlige OS, Vielfache von 3 P–0	Geradzahlige OS P–0 oder P–P
2	100			1,25
3	150		4,5	
4	200			1,0
5	250	5,0		
6	300			0,65
7	350	4,5		
8	400			0,5
9	450		0,75	
10	500			0,4
11	550	3,0		
12	600			0,35
13	650	2,5		
14	700			0,3
15	750		0,3	
16	800			0,25
17	850	1,25		
18	900			0,25
19	950	1,15		
20	1000			0,25
21	1050		0,3	
22	1100			0,25
23	1150	0,9		
24	1200			0,25
25	1250	0,8		
26	1300			0,25
27	1350		0,3	
28	1400			0,25
29	1450	0,6		
30	1500			0,25
31	1550	0,6		
32	1600			0,25
33	1650		0,3	
34	1700			0,25
35	1750	0,6		
36	1800			0,25
37	1850	0,6		
38	1900			0,25
39	1950		0,3	
40	2000			0,25

P–0 Phase–Nulleiter P–P Phase–Phase

Hinweise über Mittelspannungsnetze sowie über gelegentliche kurzzeitige Pegelüberschreitungen: siehe Text.

3.4 Die Grenzwerte sind für den Verknüpfungspunkt, d.h. den Anschlusspunkt eines Abonnenten mit dem allgemeinen Elektrizitätsversorgungsnetz, z.B. der Meßstelle, massgebend. Innerhalb einer Abnehmeranlage, z.B. eines Fabriknetzes oder einer Stromrichteranlage, dürfen andere, vom Abnehmer oder vom Gerätehersteller zu verantwortende Werte festgelegt werden.

4. Vorschlag für ein Spektrum von zulässigen OS-Spannungen

Der Vorschlag für einen zulässigen Pegel der OS-Spannungen in den NS-Netzen ist in Tabelle I eingetragen und in Figur 1 dargestellt. Die vorgeschlagenen Werte sind wie folgt zu verstehen: *Sie stellen die Grenzwerte der OS-Spannungspegel dar, die bei Zulassung einer kleinen zeitlichen und geographischen statistischen Überschreitungswahrscheinlichkeit in den NS-Netzen noch auftreten dürfen.*

Hinsichtlich der möglichen statistischen Überschreitungen wird empfohlen, die an das Netz anzuschliessenden Objekte so zu dimensionieren, dass sie kurzzeitige Pegelüberschreitungen von ca. 20% und ca. ¼ s bis einige Sekunden Dauer ohne Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit aushalten. Vorgänge kürzerer Dauer und «spikes» sind in diesen Betrachtungen nicht einbezogen.

In MS-Netzen werden als Grenzwerte für die OS, deren Rangordnung nicht ein Vielfaches von 3 ist, 80% der Werte für die NS-Netze zugelassen (die OS, deren Rangordnung ein Vielfaches von 3 ist, treten in der Regel in MS-Netzen nicht auf).

Die Immunität der beeinflussten Geräte muss durch einen Schutzabstand zwischen diesen OS-Grenzwerten und dem Immunitätspegel der Geräte bzw. sonstiger Schutzmassnahmen (z.B. Codierungsmassnahmen) gewährleistet sein. Art und Grad des Schutzes sollen die spezifischen Betriebsbedingungen der einzelnen Beeinflussten berücksichtigen und sind jeweils vom Hersteller festzulegen (Kap. 6).

Unserer Meinung nach ist der klassische Oberschwingungsgehalt, berechnet aus der quadratischen Summe der einzelnen OS-Pegel, kein taugliches Kriterium für die Festlegung der zulässigen OS-Spannungen. Ein solcher Faktor ist nämlich für die Beurteilung der Oberschwingungsauswirkungen auf keines der verschiedenen beeinflussten Geräte wie Motoren, Kondensatoren usw. anwendbar. Es müssen vielmehr je nach Gerät spezifische Summierungskriterien gebildet werden (Kap. 6).

Grenzen der Störspannungen mit Frequenzen zwischen den definierten Oberschwingungen sind hauptsächlich mit Rücksicht auf die Nichtbeeinflussung der Rundsteuerempfänger festzulegen. Die Verhältnisse sind von Fall zu Fall zu untersuchen, einerseits unter Berücksichtigung der sog. Nichtfunktionsspannung und der sog. Störspannungsgrenzkurve bezüglich Nichtfunktionierens, andererseits unter Berücksichtigung der Frequenz und Amplitude der Störspannungen sowie der Übertrittsspannungen aus benachbarten Rundsteueranlagen.

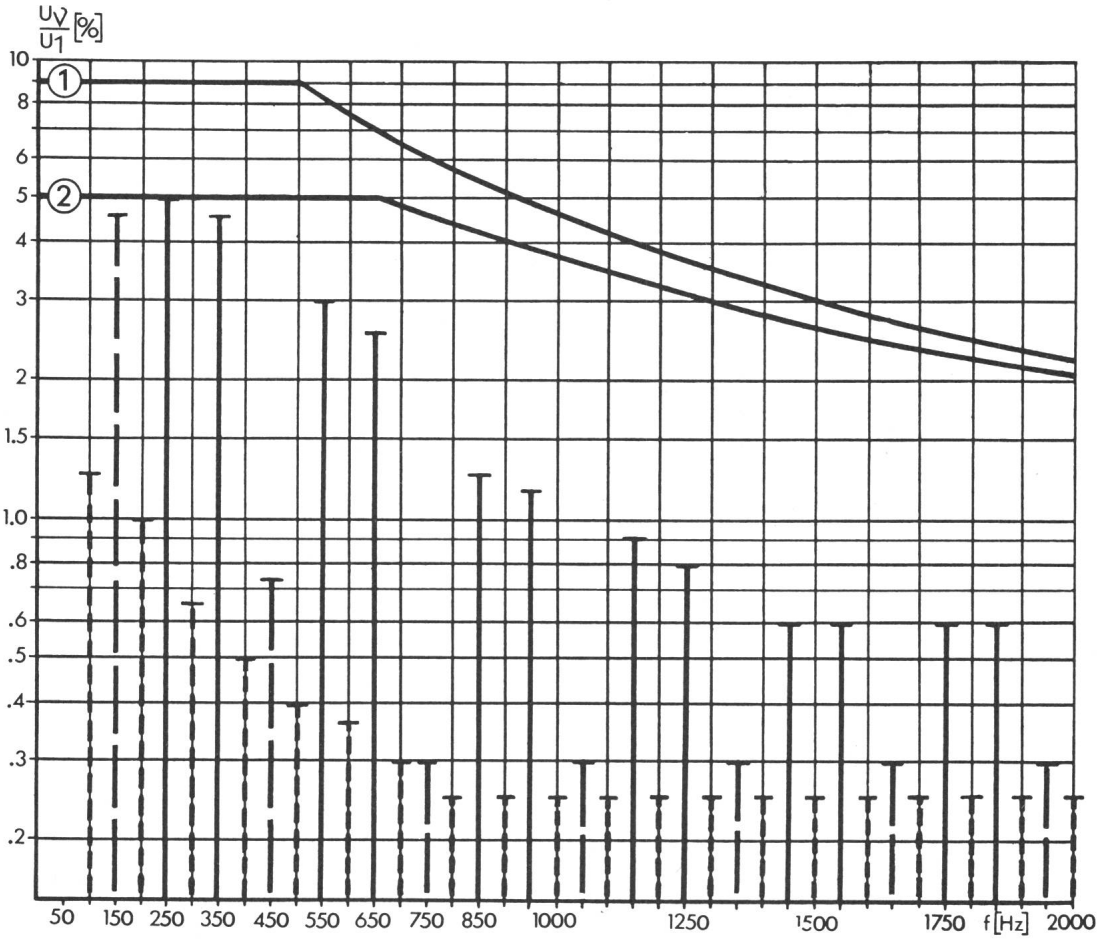

Fig. 1 Vorschlag für zulässige Oberschwingungs-Spannungspegel im Niederspannungsnetz

① «Meisterkurve»: Zulässige TRA-Spannung für Rundfunk- und Fernsehempfänger
② CEI-Publ. 146–2 (1974) Semiconductor converters – Part 2: self-commutated converters

5. Berücksichtigung der praktischen Netzverhältnisse

5.1 Damit die Grenzspektren praxis- und anwendungsgerecht festgelegt werden, müssen sie mit den im Betrieb auftretenden Verhältnissen im Netz im Einklang stehen. Es sind insbesondere die folgenden Gegebenheiten zu beachten:

– *3. OS (150 Hz):* Diese Oberschwingung ist erfahrungsgemäss hoch (Entladungslampen, Fernsehgeräte), jedoch etwas weniger hoch als die 5. OS, da sie keinen wesentlichen Beitrag aus der MS-Ebene erhält (ca. 0,5...1% weniger als die 5. OS). In nicht geerdeten MS-Netzen ist sie nur mit kleinen Differenzwerten vertreten. Als zulässig wurde 4,5% angesetzt.

– *5. OS (250 Hz):* Erfahrungsgemäss ist diese Oberschwingung diejenige mit dem höchsten Pegel. Gemessene Höchstpegel liegen heute etwa bei 3% (ohne Resonanz). Als zulässig wurde 5% angesetzt.

– *7. OS (350 Hz):* Diese OS-Spannung ist ebenfalls hoch, jedoch etwas kleiner als die 5. OS. Als zulässig wurde ebenfalls 4,5% angesetzt.

– *Ungeradzahlige OS; 11. OS (550 Hz) bis 39. OS (1950 Hz).* Die OS-Spannungen werden mit steigender Rangordnung kleiner, einerseits weil die Amplituden der von praktisch allen Quellen erzeugten OS-Spannungen mit steigender Frequenz abnehmen, andererseits wegen der sich stärker auswirkenden statistischen Winkelkompensation. Oberhalb 1000 Hz sind die OS-Spannungen im allgemeinen klein, wenn kein Resonanzfall auftritt. Bei gewissen Frequenzpaaren 11./13. OS, 17./19. OS muss man in Abweichung der Theorie mit gewissen Unsymmetrien rechnen. Bei den Frequenzen oberhalb der 21. OS wurde darauf geachtet, dass der zulässige Pegel mindestens 2mal den sog. CENELEC-EN 50006-Wert beträgt (2mal die Grenze für Einzelanlagen gemäss VSE-Regel).

– *Ungeradzahlige OS ≧ 41. OS (2050 Hz):* Dieses Frequenzgebiet wurde bis jetzt nicht untersucht, und es wird vorderhand auf eine Festlegung von Grenzwerten verzichtet.

– *Ungeradzahlige OS, deren Rangordnung ein Vielfaches von 3 ist:* Bis zur Verbreitung der Geräte der Leistungselektronik waren diese OS, abgesehen von 150 Hz, erfahrungsgemäss sehr klein. Mit dem Aufkommen weitgestreuter einphasiger elektronischer Geräte grösserer Leistung im Haushalt muss man mit einer gewissen Erhöhung des Pegels der 9. und 15. OS rechnen, was im vorgeschlagenen Spektrum berücksichtigt wurde.

– *Geradzahlige OS:* Aufgrund der bisherigen Netzmessungen wirkt sich hauptsächlich der Einfluss der Fernsehgeräte mit unsymmetrischen Speiseschaltungen aus. Es entstehen relativ hohe Werte bei 100 Hz und 200 Hz, die zu berücksichtigen sind. Bei höheren Frequenzen sind wegen abnehmender Amplitude und stärkerer Winkelkompensation nur kleine OS-Spannungen zu erwarten. Bei zukünftigen Fernsehgeräten sollten neue symmetrische Schaltungen verwendet werden, so dass die geradzahligen OS abnehmen könnten. Andererseits ist zu berücksichtigen, dass Geräte der Leistungselektronik mit unsymmetrischen Steuersätzen oder transiente Vorgänge geradzahlige OS hervorrufen können.

5.2 Wie erwähnt sollen die gesetzten Grenzen gegenüber den zurzeit in den Netzen vorhandenen OS-Spannungen eine angemessene Reserve für die in Zukunft zu erwartenden OS-erzeugenden Geräte aufweisen. Aufgrund der in den Schweizer Netzen gemessenen OS-Pegel ergibt sich, dass eine solche Reserve für alle ungeradzahligen Oberschwingungen tatsächlich vorhanden ist. Dagegen ist sie bei den geradzahligen Oberschwingungen sehr klein; bei 100 und 200 Hz besteht sie kaum mehr.

Zur Frage, ob und wie diese Reserve in Zukunft in Anspruch genommen wird, lassen sich nur allgemeine Überlegungen machen:

– In den *NS-Netzen* wird die Erzeugung von OS-Spannungen mittels Haushaltgeräten durch die Euronorm SEV-EN 50006 begrenzt. Vorausgesetzt, dass die von den Fernsehgeräten erzeugten OS-Pegel nicht mehr stark anwachsen, können die üblichen phasenanschnittgesteuerten Haushaltmaschinen und Lichtregler weiterhin angeschlossen werden. Bei Gewerbe- und Kleinindustrieanlagen werden von den Elektrizitätswerken in der Schweiz zurzeit die VSE-Empfehlungen angewendet, welche vorschreiben, dass am Verknüpfungspunkt mit dem öffentlichen Netz im Maximum OS-Spannungserhöhungen entsprechend den CENELEC-Spannungsgrenzen entstehen dürfen. Die vorgesehene Reserve gestattet den Anschluss derartiger neuer Anlagen, wobei deren Anzahl und Leistung von den jeweiligen Netzverhältnissen abhängt.

– In den *MS-Netzen* werden heute OS-erzeugende Anlagen nach den genannten VSE-Empfehlungen oder nach Sonderabmachungen beurteilt. Die vorhandene Reserve gestattet den Anschluss neuer Anlagen, wobei Anzahl und Leistung den jeweiligen Verhältnissen angepasst werden müssen.

6. Vergleich mit dem Immunitätsniveau der beeinflussten Maschinen und Geräte

Nachfolgend soll das Verhalten der in bezug auf OS-Beeinflussungen empfindlichsten Maschinen und Geräte betrachtet werden, um zu prüfen, ob die Grenzwerte im Einklang mit dem Immunitätsniveau dieser Maschinen und Geräte stehen und nicht zu unzweckmässigen Verhältnissen führen.

Asynchronmotoren: Oberschwingungsspannungen können auf verschiedene Art auf Asynchronmotoren einwirken: Erzeugung von zusätzlichen Verlusten, von Pendelmomenten, von Geräuschen. Praktisch erweist sich die zusätzliche Erwärmung der Rotorwicklung als der wichtigste Faktor, insbesondere bei Stromverdrängungsmotoren, wo u.U. unzulässige Temperaturerhöhungen auftreten können. Eine Vorschrift bezüglich der zulässigen OS-Spannungen in der Speisespannung muss so festgelegt werden, dass die Auswirkungen auf die Lebensdauer der Maschinen unwesentlich bleiben. Die mittlere Zusatzerwärmung dürfte im Durchschnitt über eine gewisse Zeit einen bestimmten Wert (z.B. 5%) nicht übersteigen; auch eine bestimmte kurzzeitige Zusatzerwärmung sollte nicht überschritten werden.

Der Einfluss der Oberschwingungen hängt sehr stark von der Bauart der Maschine ab, so dass hier nur Grenzkriterien angegeben werden, bei deren Beachtung die OS-Verhältnisse tragbar sind:

– Die Einzelwerte der OS-Spannungen gemäss Tabelle I dürfen nicht überschritten werden;

– die Gesamtwirkung der für Dreiphasenmotoren gemäss nachstehender Formel gewichteten OS-Spannungen soll die angegebenen Werte nicht überschreiten; dabei können die Frequenzen oberhalb der 13. OS-Spannung (> 650 Hz) vernachlässigt werden:

$$\alpha = 5 \cdot 10^4 \sum_{n} \left(\frac{U_\nu}{U_{50}}\right)^2 \cdot \frac{1}{\nu^2}, \text{ in } \% \qquad n = 5, 7, 11, 13$$

soll im Maximum 8 % betragen,
soll im Durchschnitt über 24 h bzw. 5 % nicht hinausgehen.

Bei den vorgeschlagenen Grenzwerten (Tab. I) wird die erste Bedingung gerade noch erfüllt (7,6 statt 8 %); die zweite Bedingung dürfte in Netzen der öffentlichen Versorgung in Anbetracht der Pegelvariationen im Laufe des Tages normalerweise auch erfüllt sein. Sie ist z. B. eingehalten, wenn für die 5., 7., 11. und 13. OS je 80 % der Werte nach Tabelle I auftreten oder wenn die 5. OS allein vorhanden ist und 5 % beträgt, also dauernd auf dem zulässigen Maximum steht.

Bemerkung: Die gegenwärtige Publikation 34–1 der CEI, «Rotierende elektrische Maschinen» (bzw. SEV-Regeln 3009), schreibt nur vor, dass beim «Fehlen von besonderen Vereinbarungen angenommen wird, dass die Maschine an ein Netz von praktisch sinusförmiger Spannung angeschlossen ist. Eine Spannung gilt als praktisch sinusförmig, wenn keiner ihrer Momentanwerte vom Momentanwert der Grundschwingung um mehr als 5 % des Grundschwingscheitelwertes abweicht.» Eine Revision dieser Publikation sollte eine differenziertere Betrachtung der OS-Problematik einbeziehen.

Synchronmaschinen: Auch bei den Synchronmaschinen haben die OS-Spannungen des Netzes Einwirkungen; dabei ist die Zusatzerwärmung in der Dämpferwicklung der wichtigste Faktor. Bei den meist grossen Einheiten ist aber zu berücksichtigen, dass nur die im HS-Netz vorhandenen, d.h. reduzierten Pegel einwirken und dass diese Werte durch die üblicherweise vorgeschalteten Transformatoren auf ca. 60 % herabgesetzt werden. Die Zusatzerwärmung bleibt somit bei den vorgeschlagenen OS-Spannungen auf einen tiefen Wert begrenzt.

Transformatoren: Die OS-Spannungen verursachen in den Netztransformatoren eine leichte Erhöhung der Eisenverluste, die bei den vorgeschlagenen Pegeln praktisch vernachlässigbar ist. Es besteht auch keine diesbezügliche Vorschrift. Wichtig wird es sein, den Einfluss dieser Spannungen auf den Lärmpegel der Transformatoren zu untersuchen.

Kondensatoren: Nach CEE-Publikation 70 (bzw. SEV-Regeln 3011) müssen Leistungskondensatoren für einen dauernden Betrieb mit einer Spannung ausgelegt sein, deren Effektivwert das 1,1fache der Nennspannung nicht übersteigt, sowie mit einem Strom, dessen Effektivwert das 1,3fache des Stromes nicht übersteigt, der bei sinusförmiger Nennspannung und Nennfrequenz fliesst. Die Beanspruchung der Kondensatoren durch alle ungeradzahligen Oberschwingungen des vorgeschlagenen Grenzspektrums bis zur 39. Ordnungszahl und bei 10 % über der Nennspannung liegender Netzspannung führt zu $U_{eff} = 1{,}104\ U_n$ und $I_{eff} = 1{,}4\ I_n$. Der Effektivwert der Spannung wird also durch die Oberschwingungen nur unwesentlich beeinflusst; der Stromeffektivwert liegt dagegen über dem vorgeschriebenen Wert von $1{,}3\ I_n$.

Da es jedoch aufgrund der durchgeführten Netzmessungen sehr unwahrscheinlich erscheint, dass sämtliche Oberschwingungen gleichzeitig und während längerer Zeit mit ihrem Höchstwert auftreten, dürfte die Strombelastung der Kondensatoren in zulässigen Grenzen liegen.

Für die Erwärmung des Dielektrikums eines Kondensators ist die darin erzeugte Verlustleistung massgebend. Geht man davon aus, dass im betrachteten Frequenzbereich der Verlustfaktor konstant ist, so ergibt sich für die vorgeschlagenen OS-Spannungswerte bei einer um 10 % erhöhten Netzspannung $Q = 1{,}28\ Q_n$, wobei $Q_n = U_n \cdot I_n$ ist. Da die thermische Stabilitätsprüfung mit einer Leistung durchgeführt wird, die das 1,44fache der Nennleistung beträgt, ist die zusätzliche thermische Belastung durch Oberschwingungen unkritisch.

Es darf angenommen werden, dass die Spannung über den Kondensatoren infolge der vorgeschalteten Netzinduktivitäten für höhere Frequenzen praktisch zusammenbricht. Andererseits muss allgemein auf die Gefahr von Resonanzen mit Netzreaktanzen hingewiesen werden, die durch geeignete Massnahmen zu verhindern sind.

Elektronische Betriebsmittel: Dieser Begriff umfasst sowohl elektronische Betriebsmittel zur Informationsverarbeitung als auch Betriebsmittel der Leistungselektronik, die auf Starkstromanlagen einwirken (VDE 0160/77). OS-Spannungen können Störauswirkungen auf Steuer- und Speiseeinrichtungen haben. In der Leistungselektronik können sie die Kommutierungsverhältnisse beeinflussen, wenn sie den Spannungsnulldurchgang verschieben. Gemäss CEI-Publ. 146–2, «Semiconductor converters», müssen diese Anlagen so beschaffen sein, dass sie bei den folgenden Bedingungen bezüglich der Kurvenform der Netzwechselspannung betrieben werden können: Der Oberschwingungsgehalt darf 10 % nicht überschreiten, und der zulässige Pegel der einzelnen Oberschwingungen beträgt bis 650 Hz im Maximum 5 % und sinkt dann bis 5000 Hz auf 1 %. Diese Grenzen bezüglich der einzelnen Oberschwingungen liegen oberhalb 350 Hz z.T. beträchtlich höher als die Forderungen des vorliegenden Vorschlages, dessen Erfüllung somit keine Schwierigkeiten entgegenstehen.

Elektrizitätszähler: Oberschwingungen verursachen in Zählern Zusatzfehler, die sowohl von den OS-Komponenten in der Spannung wie auch von den OS-Komponenten im Strom abhängen. Versuche mit diversen Typen von Ferraris-Haushaltzählern Kl 2 führten zu den folgenden überschlägigen Ergebnissen:

- Mit einer 3. OS von 5 % sowohl in der Spannung wie im Strom (z. B. ohmsche Last) entsteht ein Zusatzfehler in der Grössenordnung $\leqq \pm 0{,}6\,\%$
- Mit einer 3. OS von 10 % in der Spannung und im Strom wäre der Zusatzfehler in der Grössenordnung von $\leqq \pm 1{,}5\,\%$
- Mit einer 5. OS von 5 % wäre der Zusatzfehler ca. $\leqq \pm 0{,}3\,\%$; mit einer 5. OS von 10 % wäre der Zusatzfehler ca. $\leqq \pm 1{,}0\,\%$
- Mit einer 7. OS von 5 % wäre der Zusatzfehler ca. $\leqq \pm 0{,}2\,\%$; mit einer 7. OS von 10 % wäre der Zusatzfehler ca. $\leqq \pm 1{,}0\,\%$

Bei den vorgeschlagenen OS-Spannungspegeln von maximum 5 % entstehen Zusatzfehler, die tragbar sind. Die zusätzlichen Fehler bei höheren OS-Spannungen könnten dagegen u. U. schon zu hoch sein.

Ferraris-Präzisionszähler weisen eine kleinere Oberschwingungsabhängigkeit als Haushaltzähler auf, so dass auch hier die vorgeschlagenen Werte als annehmbar zu betrachten sind. Statische Präzisionszähler, die die Momentanwerte von U und I verarbeiten, sind im Prinzip OS-unabhängig und messen praktisch fehlerlos.

Rundsteuerempfänger: OS-Spannungen hoher Amplitude können den Funktionspegel des Empfänger-Eingangsteiles beeinflussen (erhöhen oder herabsetzen):

Das CENELEC TC 102, «Rundsteuerempfänger», gibt in einem sich in Vorbereitung befindenden Harmonisierungsdokument ein Spektrum von OS-Spannungen an, die für die Prüfung der Rundsteuerempfänger empfohlen werden. Die in diesem Dokument festgelegten Werte sind z.T. sehr hoch, jedoch wird ausdrücklich erwähnt, dass sie nicht als zulässige

OS-Pegel im Netz, sondern als Prüfwerte zu betrachten sind. Die Prüfung der Empfänger bei Anwesenheit von Oberschwingungen erfolgt auf zwei Arten: Entweder wird nur eine zur Steuerfrequenz benachbarte Oberschwingung mit dem angegebenen hohen Pegel angelegt, oder es werden drei zu der Steuerfrequenz benachbarte Oberschwingungen gleichzeitig angelegt. In diesem Falle sind die Einzelpegel mit dem Faktor 0,6 zu multiplizieren; die derart reduzierten Pegel stimmen mit dem vorliegenden Vorschlag annähernd überein.

Das Verhalten von modernen Rundsteuerempfängern bzw. die Ansprechspannung ihrer Eingangsteile werden durch diese Pegel wenig beeinflusst. Dagegen könnten Empfänger aus den ersten Generationen u. U. gestört werden. In Netzen mit solchen Empfängern sind für die beeinflussenden Frequenzen Spezialvorschriften vorzusehen.

Computer und Prozessrechner: Die Hersteller stellen hinsichtlich der Oberschwingungen in der Speisespannung von Rechnern Anforderungen folgender Art: Der Klirrfaktor bei Leerlauf muss kleiner sein als 3 % (DEC) bzw. 5 % (IBM); oder das Verhältnis von Scheitelwert zu Effektivwert muss im Bereich 1.41 ± 7 % (CDC) bleiben.

Diese Anforderungen sind recht scharf: Die erste Bedingung kann z. B. derart in die Praxis übersetzt werden, dass der zulässige Oberschwingungsgehalt von 5 % nur einen Pegel von je 3,5 % für die gleichzeitig auftretende 5. und 7. Oberschwingung erlaubt. Die zweite Bedingung begrenzt die arithmetische Summe aller Oberschwingungen unter Beachtung ihrer Phasenlage auf 7 %. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Grenzen an vielen Orten überschritten werden, ist nicht vernachlässigbar. Eine Herabsetzung der zulässigen OS-Spannungspegel nur wegen dieser Geräte würde unseres Erachtens zu einer volkswirtschaftlich untragbaren Belastung der viel zahlreicheren OS-Erzeuger führen. Praktisch sind bis jetzt Störungen von derartigen Geräten und Anlagen wegen Oberschwingungseinflüssen nicht bekannt. Falls tatsächlich Störungen wegen der vorgeschlagenen OS-Spannungspegel auftreten, wäre es zweckmässiger, dass die Computer- und Prozessrechnerhersteller Massnahmen treffen, die Immunitätsgrenze dieser Geräte zu erhöhen, oder dass sie eigene Speisungen vorsehen.

Unterhaltungselektronik: Die modernen, transistorisierten Rundfunkempfänger und Verstärkeranlagen sind in der Regel auf die vorgeschlagenen OS-Spannungspegel unempfindlich, die OS-Töne dringen nicht bis zur letzten Stufe durch.

Bei Schwarzweiss-Fernsehempfängern ohne Spannungsregelung bewirken Änderungen der Speisespannungsamplitude Schwankungen der Bildgrösse und -helligkeit. Stabile Oberschwingungen haben keine störenden Folgen, dagegen können sich ständige Schwankungen unangenehm auswirken. Die für die Zuschauer noch erträglichen Schwankungen wären festzulegen.

Farbfernsehgeräte sind weniger empfindlich, da sie mit Spannungsstabilisatoren ausgerüstet sind.

Die seinerzeit im Zusammenhang mit der Beeinflussung der Rundfunk- und Fernsehempfänger durch die Tonfrequenzspannungen der Rundsteueranlagen aufgestellte Grenzkurve (sog. Meisterkurve) kann als Referenz für die Beeinflussung durch OS-Frequenzen dienen. Die Meisterkurve liegt weit oberhalb der hier vorgeschlagenen Pegel (Fig. 1).

Netzbetrieb/Erdschlusslöschung: Die vorgeschlagenen OS-Pegel haben nach den heutigen Erkenntnissen keinen Einfluss auf den normalen Netzbetrieb. Auswirkungen sind hauptsächlich im Zusammenhang mit den Erdschlussproblemen zu prüfen.

In MS- und HS-Netzen erhöhen die OS im Erdschlussfall den Gesamterdschlußstrom. In Netzen mit isoliertem oder starr geerdetem Sternpunkt fällt der Einfluss bzw. die Erhöhung nicht ins Gewicht und hebt z. B. in MS-Netzen, auch bei grösseren Kabelnetzen, den resultierenden Gesamterdschlussstrom nur um maximal 10...15 % an.

Anders liegen die Verhältnisse bei Netzen mit Erdschlusslöschung. In derartigen, vorwiegend MS-Netzen wird der kapazitive 50-Hz-Erdschlußstrom mittels auf Resonanz bei 50 Hz abgestimmter Drosseln im Sternpunkt der Speisetransformatoren auf kleine Werte kompensiert. Die OS-Ströme werden dabei nicht kompensiert und fliessen über die Fehlerstelle, wo sie eine Erhöhung des Erdschlussreststromes bewirken. Sie können zur bestimmenden Grösse im Erdschlussreststrom werden. Berechnungen an einem MS-Beispiel bei Schweizer Verhältnissen haben gezeigt, dass dieser OS-Anteil bei Einwirkung der vier ersten ungeradzahligen Oberschwingungen mit dem maximal vorgeschlagenen MS-Pegel den Effektivwert des Erdschlussreststromes um einen Faktor 2 bis 3 erhöhen kann. Man bleibt dabei noch unterhalb der Dimensionierungsgrenze für Erdungsanlagen (30 A), jedoch ohne grosse Reserve. Die für MS-Netze vorgeschlagenen zulässigen OS-Pegel sind also auch für die Erdschlusslöschung tragbar, besonders wenn man berücksichtigt, dass kaum alle Oberschwingungen gleichzeitig mit dem maximalen Pegel auftreten werden. Höhere Werte dürften jedoch nicht mehr zulässig sein, da sie zu den grossen Erdschlussrestströmen in den Erdungsanlagen führen würden.

7. Zusammenfassung

Es ist notwendig, für die mit der Beeinflussung durch Oberschwingungen zusammenhängenden Probleme über eine für alle Beteiligten (Beeinflussende, Beeinflusste, Elektrizitätswerke) gemeinsame Grundlage zu verfügen. Zu diesem Zweck werden Spektren der zulässigen OS-Spannungspegel in den NS-Netzen und den MS-Netzen vorgeschlagen. Dabei wird auf die geographisch und zeitlich statistische Häufigkeitsverteilung hingewiesen; dementsprechend dürften die Grenzwerte in Ausnahmefällen, wenn nur eine geringe Wahrscheinlichkeit hierzu vorliegt, überschritten werden. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Vorschlag die Gesetzmässigkeiten der Entstehung der OS-Spannungen in den Netzen berücksichtigt und gegenüber den zurzeit vorhandenen Höchstpegeln eine angemessene Reserve für die in Zukunft zu erwartenden Geräte oder Anlagen besteht.

Aus der Sicht der Beeinflussten wurde untersucht, ob der Vorschlag mit dem heutigen Immunitätsniveau im Einklang steht. Dies ist bei den meisten Maschinen und Apparaten der Fall; bei gewissen Geräten müssen hingegen Verbesserungen vorgesehen oder sogar Regelungen revidiert werden. Keine Probleme sollten bei elektronischen Betriebsmitteln, Elektrizitätszählern, modernen Rundsteuerempfängern sowie Geräten der Unterhaltungselektronik entstehen, ebenso bei Kondensatoren und im Netzbetrieb sowie für die Erdschlusslöschung, wenn nicht alle Oberschwingungen gleichzeitig mit dem maximalen Pegel auftreten, was praktisch zutreffen dürfte. Dagegen sollten die angegebenen Grenzen bei gewissen Geräten überprüft werden. Dies gilt z. B. für Asynchronmotoren (eine Revision der betreffenden CEI-Publikation, die den praktischen

Verhältnissen nicht mehr entspricht, wäre empfehlenswert) sowie für Computer und Prozessrechner (die Lieferantenangaben sind sehr vorsichtig).

Alles in allem scheint der Vorschlag ausgewogen und für alle Beteiligten tragbar. Er dürfte somit seinen Zweck, eine gemeinsame Grundlage zu bilden, erfüllen.

Literatur

[1] Beeinflussung in Netzen durch Einrichtungen der Leistungselektronik. Informationstagung, 12. und 13. November 1974, Zürich. Zürich, SEV/VSE, 1974.

[2] Aktuelle Probleme der niederfrequenten Beeinflussung in elektrischen Netzen. Berichtsband der SEV-Kommission zum Studium niederfrequenter Störeinflüsse. Zürich, SEV, 1978.

Adresse der Autoren

SEV-Kommission zum Studium niederfrequenter Störeinflüsse, c/o Schweiz. Elektrotechnischer Verein, Sekretariat des CES, Postfach, 8034 Zürich.

Verfasser im Auftrag der Kommission: dipl. Ing. *G. Goldberg*, c/o Landis & Gyr Zug AG, 6301 Zug.