

Transiente Harmonische durch Reversierantriebe mit Stromrichtern

Autor(en): **Gretsch, R. / Krost, G.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **77 (1986)**

Heft 5

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904168>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

Transiente Harmonische durch Reversierantriebe mit Stromrichtern

R. Gretsch, G. Krost

Reversierantriebe mit Stromrichtern belasten die speisenden Netze mit Stromharmonischen, die sich nach Betrag und Winkel rasch ändern können. Diese Stromharmonischen werden am Beispiel eines Waschautomaten mit Zündensatzsteuerung sowie von Walzwerkantrieben messtechnisch untersucht und die dadurch an den frequenzabhängigen Netzimpedanzen hervorgerufenen Spannungsharmonischen bei statistischer bzw. bei deterministischer Betrachtung diskutiert.

Les entraînements réversibles à convertisseurs de courant chargé le réseau d'alimentation par des harmoniques, dont la valeur et l'angle peuvent varier rapidement. Ces harmoniques sont analysés sur la base de mesures dans le cas d'un lave-linge à commande par amorçage, ainsi que dans celui d'entraînements de laminoirs. Les harmoniques de tension, produits aux impédances du réseau dépendantes de la fréquence, sont traités par des considérations d'ordre statistique et déterministe.

Die Verfasser danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung.

Adresse der Autoren

Prof. Dr.-Ing. habil. Ralf Gretsch,
Dr.-Ing. Gerhard Krost, Forschungsgruppe
Netzrückwirkungen, Lehrstuhl für Elektrische
Energieversorgung, Universität Erlangen-
Nürnberg, D-8520 Erlangen.

1. Einleitung

Über Stromrichter gespeiste Motoren, deren Drehzahl sich betriebsmässig rasch ändert, belasten die Versorgungsnetze mit betrags- und winkelmässig ebenfalls rasch variierenden Stromharmonischen. Die Auswirkungen dieser «transienten» Oberschwingungen gewinnen zunehmende Bedeutung, da sowohl die Anzahl solcher Antriebe, z. B. auf dem Sektor der Haushaltgeräte bei Waschautomaten, wie auch ihre Leistung, z. B. bei Walzgerüsten, anwächst. In der Industrie kann die im Stromrichter umgesetzte Leistung einen erheblichen Anteil, z. B. 80%, an der Gesamtleistung des speisenden Netzes haben. Auf dem Haushaltsektor können Marktanteil s und Gebrauchsfaktor h kleinerer Geräte sehr gross sein, z. B. $s \approx 85\%$ [1] und $h \approx 25\%$ bei Waschautomaten an «Waschtagen».

Transiente und stationäre Oberschwingungs-Stromzeiger sind unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Zustandshäufigkeit zu überlagern; der resultierende Strom verursacht an der Netzimpedanz eine Spannungsharmonische, die sich jeweils geometrisch zu der im Netz bereits vorhandenen Oberschwingungsspannung gleicher Ordnung addiert. Für empfindliche Geräte, wie elektronische Steuerungen oder Rundsteuerempfänger, sind die an einzelnen Netzanschlusspunkten hoher Impedanz entstehenden maximalen Augenblickswerte der Spannungsharmonischen massgeblich; für die Netzeinspeisung sind dagegen die durchschnittlichen Pegel der Oberschwingungsspannungen wichtig, die sich jeweils aus der Summe der nach ihren Häufigkeiten bewerteten Oberschwingungs-Stromzeiger aller Betriebszustände und aller Antriebe ergeben.

2. Messverfahren

Als Messverfahren für transiente Harmonische stehen durchstimmbare

Filter, analoge Korrelationsverfahren [2] und die diskrete Fouriertransformation [3] zur Verfügung. Der Vergleich der Verfahren [4] zeigt:

– Selektive Filter (Superheterodyne) eignen sich wegen des Verlustes der Phaseninformation für die Messung nicht. Auch wenn gelegentlich nur die Amplituden interessieren, so können sie schnellen transienten Vorgängen nicht folgen.

– Orthogonale Korrelation und diskrete Fouriertransformation erlauben dagegen die reproduzierbare Messung transienter Harmonischer; dazu genügen wenige Angaben über die Glättungszeitkonstante beim Korrelator bzw. über Fensterbreite und Fensterform bei der diskreten Fourieranalyse; ggf. sind weitere Festlegungen für die Kompensation der Grundschwingung zu treffen. Diese Parameter müssen im konkreten Fall an die Geschwindigkeit der ablaufenden Vorgänge angepasst werden, um die erwähnten Messfehler möglichst gering zu halten. Weitere Angaben über Bandbreite und Selektivität erübrigen sich.

Die im folgenden beschriebenen Zeitverläufe und Ortskurven (Trajektorien) der bei verschiedenen Anlaufvorgängen auftretenden Oberschwingungsströme wurden mit dem in [2] beschriebenen Korrelationsverfahren mit einer Glättungszeitkonstanten von $T = 28$ ms ermittelt; die Zeitverläufe der untersuchten Ströme lagen auf Magnetband vor, so dass die Auswertung der Grundschwingung und beliebiger Harmonischer jeweils ein und desselben Hochlaufvorgangs möglich war. Die Übereinstimmung mit Ergebnissen aus der spektralen Zerlegung der Anlaufströme (diskrete Fouriertransformation DFT) wurde an einigen Beispielen überprüft, wobei als Breite des Abtastfensters eine Grundschwingungsperiode (20 ms) gewählt wurde.

3. Transiente Harmonische bei Haushaltgeräten

Seit einiger Zeit werden von verschiedenen Herstellern Waschautomaten gefertigt, die statt von polumschaltbaren Hilfsphasen-Asynchronmotoren durch Universalmotoren mit Zündeinsatzsteuerung angetrieben werden. Als Vorteile ergeben sich geringeres Volumen bzw. Gewicht des Antriebsmotors, grössere Laufruhe sowie grössere Drehzahlpreizung.

Der untersuchte Waschautomat verfügt über eine Drehzahlregelung mit Istwerterfassung durch einen Tachogenerator sowie den Wechselstromsteller (Triac) als Stellglied. Im Programmschritt «Schleudern» wird die Trommel für einige Sekunden auf eine Drehzahl von etwa 90 min^{-1} gebracht, um die Wäsche gleichmässig zu verteilen («Mischen»); mit dem unmittelbar anschliessenden Hochlauf auf die Schleuderenddrehzahl sind die stärksten Netzrückwirkungen während des gesamten Waschzyklus verbunden. Im Versuch war die Trommel nicht mit Wäsche gefüllt und eine Schleuderenddrehzahl von nur 700 min^{-1} eingestellt; im praktischen Betrieb dürften daher sowohl die Stromamplituden wie auch die Hochlaufzeiten grösser sein.

3.1 Trajektorien

In Figur 1 sind für den Schleuderhochlauf dargestellt: der Zündwinkel $\gamma(t)$, die Drehzahl $n(t)$ der Trommel, Betrag und Winkellage der Stromgrundschiwingung $I_1(t)$ sowie der Stromharmonischen 3. und 5. Ordnung $I_3(t)$ bzw. $I_5(t)$. Die Figuren 2a-c zeigen die aus den in Figur 1c-h dargestellten Zeitverläufen gewonnenen Ortskurven (Trajektorien) der Ströme $I_1(t)$, $I_3(t)$ und $I_5(t)$ in der komplexen Ebene jeweils für die Dauer des beschriebenen Schleuderhochlaufs; die reelle Achse orientiert sich dabei grundsätzlich am positiven Nulldurchgang der Netzspannungsgrundschiwingung.

Der Zündwinkel beträgt während des «Mischens» 128° ; er wird vom Drehzahlregler zum Hochlauf schwingend bis auf 0° verkleinert. Dadurch wächst natürlich der Grundschiwingungsstrom bei gleichzeitiger Phasendrehung aus induktiver in ohmsche Richtung an (Fig. 1c, d und 2a). Auch die Oberschwingungs-Ströme I_3 und I_5 nehmen mit der Gesamtamplitude des Stromes im Betrage stark zu und drehen sich jeweils näherungsweise um

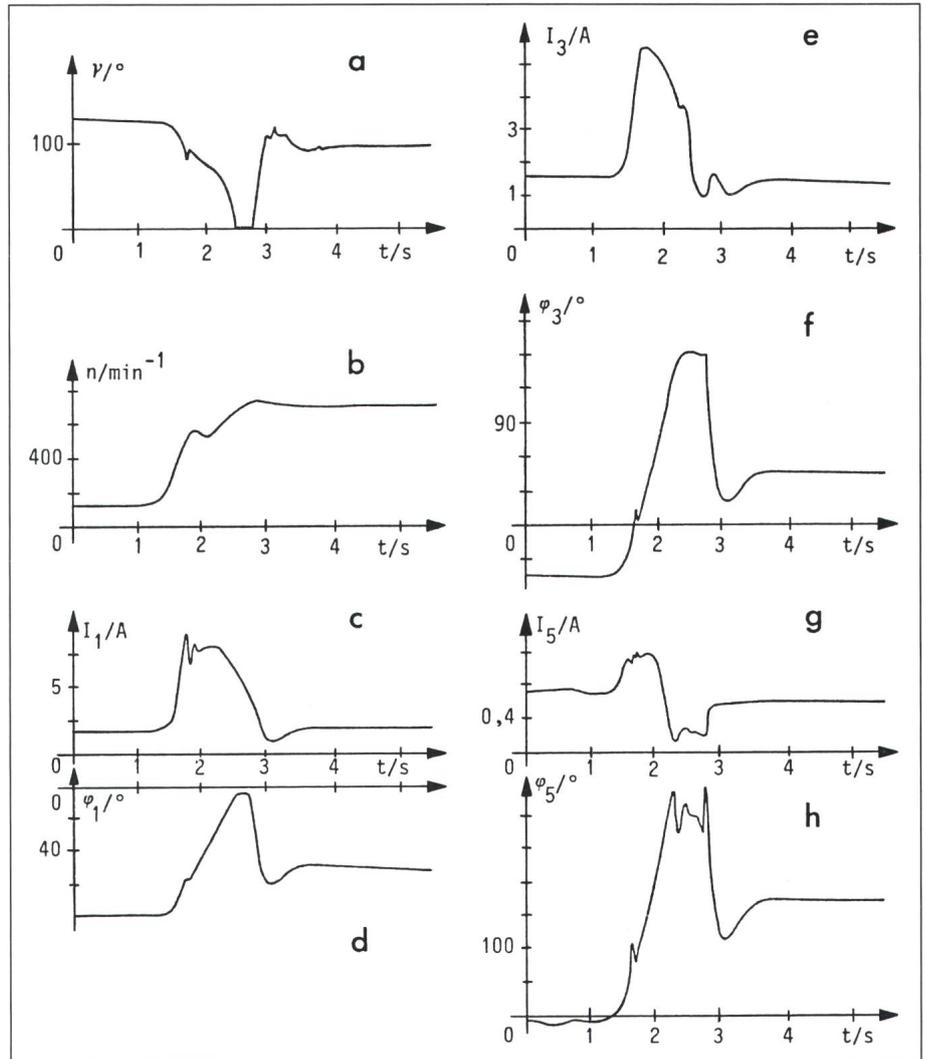


Fig. 1 Zeitverläufe bei einem Schleuderhochlauf eines Waschautomaten mit Zündeinsatzsteuerung

a Zündwinkel γ

b Drehzahl n

c Betrag des Grundschiwingungsstromes I_1

d Phasenlage des Grundschiwingungsstromes φ_1

e Betrag der 3. Stromharmonischen I_3

f Phasenlage der 3. Stromharmonischen φ_3

g Betrag der 5. Stromharmonischen I_5

h Phasenlage der 5. Stromharmonischen φ_5

den 3- bzw. 5fachen Winkel der Grundschiwingung ebenfalls in positiver Richtung (Fig. 1e-h und 2b, c).

Der Zündwinkel verharrt für etwa 0,3 s bei 0° ; lediglich in diesem Zeitbereich lückt der Laststrom nicht. Die Harmonischen 3. und 5. Ordnung gehen dabei nicht auf null zurück, da der Motor wegen der grossen Stromamplituden in Sättigung gerät; der zugehörige Stromzeiger 3. Ordnung liegt im 2., derjenige 5. Ordnung im 4. Quadranten (Fig. 1f, h bzw. 2b, c.). Bei Erreichen der Schleudernenddrehzahl wird der Zündwinkel wieder vergrössert; unter Betragsabnahme drehen die Ströme 1., 3. und 5. Ordnung nun wieder in negative Richtung, wobei sich auch hier die jeweiligen Drehwinkel näherungsweise proportional zur Ordnung der Harmonischen verhalten.

Nach einigen reglerbedingten Schwingungen wird der stationäre Endwert mit einem Zündwinkel von 101° erreicht.

Die Drehzahl der Trommel folgt der Änderung des Zündwinkels γ mit einer Verzögerungszeit von etwa 0,2 s (Fig. 1b); dies ist im wesentlichen bedingt durch die mechanischen Trägheitsmomente des Antriebs.

3.2 Netzrückwirkungen

3.2.1 Durchschnittliche Stromharmonische eines Waschautomaten mit Zündeinsatzsteuerung

Die durchschnittlichen stationären Oberschwingungsströme I_{vs} eines Waschautomaten mit Zündeinsatzsteuerung während seiner monatlichen

Betriebszeit T_B ergeben sich aus der Doppelsumme

$$\bar{I}_{vs} = \sum_i [I_{vi} \cdot a_i \cdot \sum_p (T_{ip} \cdot n_p / T_B)] \quad (1)$$

Darin bedeuten

- n_p die durchschnittliche monatliche Benutzungshäufigkeit bestimmter Waschprogramme p ,
- $T_B = 1055$ min die durchschnittliche monatliche Gesamtbenutzungszeit eines Waschautomaten,
- T_{ip} die Gesamtlaufzeit bestimmter Programmteile i während eines Waschprogrammes p , die durch gleiche Parameterkombination i gekennzeichnet sind, z. B. Wasserstand, Trommeldrehzahl und -füllung,
- a_i die gemessene relative Einschaltdauer des Motors im Programmteil i und
- I_{vi} den zugehörigen Oberschwingungsstrom v -ter Ordnung als Endpunkt der jeweiligen Hochlauf-Trajektorie.

Entsprechend ergibt sich der mittlere Gesamtstrom \bar{I}_{vh} aus allen Hochlaufvorgängen, wenn in Gl. (1) für T_{ip} die Summenzeit aller Hochlaufvorgänge gleicher Parameterkombination i innerhalb eines Programms p und für den Motorstrom I_{vi} der jeweilige zeitliche Mittelwert während des Anlaufs

$$\bar{I}_{vh} = 1/T_h \cdot \int_0^{T_h} [\text{Re}(I_v(t)) + j \text{Im}(I_v(t))] dt \quad (2)$$

eingesetzt werden; natürlich gilt hier $a_i = 1$. Abschliessend sind stationäre und transiente Ströme zu überlagern:

$$\bar{I}_v = \bar{I}_{vs} + \bar{I}_{vh} \quad (3)$$

Im konkreten Fall des untersuchten Gerätes ergibt sich beispielsweise als durchschnittlicher Strom 3. Ordnung

$$\bar{I}_3 = 0,61 \text{ A} \cdot e^{-j39^\circ} + 0,06 \text{ A} \cdot e^{-j30^\circ} = 0,67 \text{ A} \cdot e^{-j38^\circ} \quad (3a)$$

bzw. im ungünstigsten Fall bei Schätzung aller Parameter zur sicheren Seite hin

$$\bar{I}_{3\text{max}} = 0,74 \text{ A} \cdot e^{-j45^\circ} + 0,11 \text{ A} \cdot e^{-j32^\circ} = 0,85 \text{ A} \cdot e^{-j43^\circ} \quad (3b)$$

Durch die Berücksichtigung der Anlaufvorgänge erhöht sich der durchschnittliche Gesamtstrom also im Mittel um etwa 10%, maximal um 15%.

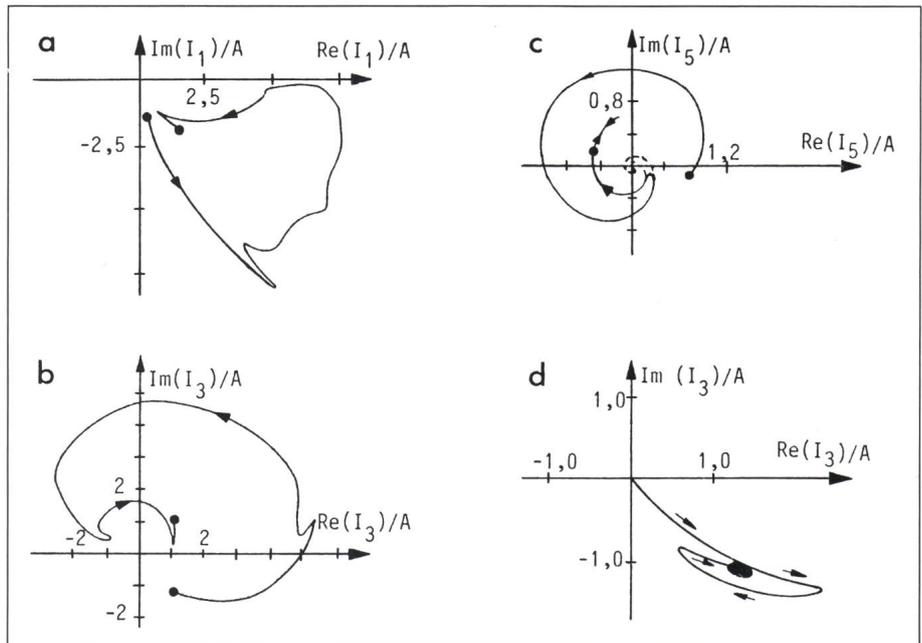


Fig. 2 Trajektorien beim Hochlauf eines Waschautomaten mit Zündleistungssteuerung

- a für die Grundschiwingung } Schleuderhochlauf
- b für die 3. Harmonische }
- c für die 5. Harmonische }
- d für die 3. Harmonische } Reversierhochlauf

Punktiert ist in Figur 2c der theoretische Verlauf bei einer Zeitkonstanten des Messgerätes von $T_m \rightarrow 0$ angegeben.

3.2.2 Statistische Überlagerung

Die Rückwirkungen von mehreren aus dem gleichen Netz versorgten Waschautomaten mit Zündleistungssteuerung an einem Aussenleiter können wie folgt abgeschätzt werden:

$$\Sigma I_v = \bar{I}_v \cdot z(P; n) \quad (4a)$$

Bei gegebener Wahrscheinlichkeit, z. B. $P = 95\%$, belasten von n insgesamt im Netz gleichzeitig betriebenen Maschinen nicht mehr als maximal z den gleichen Aussenleiter; die Zahl z lässt sich über die Binomialverteilung

$$\sum_{x=0}^z \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \geq P \quad (4b)$$

ermitteln. In Figur 3 ist Gl. (4b) für $p = 1/3$, d. h. durchschnittlich gleiche Verteilung der Geräte auf die Aussenleiter, ausgewertet. Von N in einem Netz vorhandenen Waschautomaten werden mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr als

$$n = g_{\text{max}} \cdot N \quad (4c)$$

Geräte gleichzeitig betrieben. Der maximale Gleichzeitigkeitsfaktor wurde in [5] zu $g_{\text{max}} = 0,25$ geschätzt. Zusätz-

lich ist angenommen, dass ab 1993 alle Waschautomaten über Zündleistungssteuerung verfügen. Die Anzahl N der Geräte kann über die bekannte Marktsättigung für Waschautomaten $s \approx 0,85$ [5] und die Nennleistung S_{nT} des das Netz speisenden Transformators abgeschätzt werden

$$N = (S_{nT} / S_{HH}) s \quad (4d)$$

wenn z. B. für den mittleren Anschlusswert S_{HH} eines schwach elektrifizierten Haushaltes eine Leistung von etwa 1,5 kVA angenommen wird.

Der Gesamtstrom aller an einem Leiter gleichzeitig betriebenen Wasch-

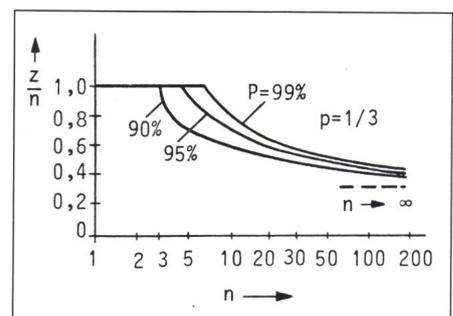


Fig. 3 Anteil (z/n) der bei gegebener Wahrscheinlichkeit P an einen bestimmten Aussenleiter angeschlossenen Geräte, abhängig von der Gesamtzahl n der Geräte im Netz bei durchschnittlicher Gleichverteilung

automaten eines Netzes nach Gl. (4a) verursacht an der Transformatorimpedanz

$$\underline{Z}_{vT} \approx v(u_r + ju_x) \frac{U_n^2}{S_{nT}} \quad (5a)$$

die zugehörige Spannung $\underline{U}_{vT} = \underline{Z}_{vT} \cdot \underline{\Sigma I}_v$. Der imaginäre Anteil u_x in Gl. (5a) ist dabei praktisch mit der relativen Kurzschlussspannung $u_k \approx 5\%$ identisch. Werte für den resistiven Anteil u_r können z.B. aus [6] entnommen werden; auch dieser Anteil nimmt in erster Näherung frequenzlinear zu [7]. Es wird angenommen, dass die Spannung \underline{U}_{vT} in gleicher Höhe bei positiv- bzw. negativ-sequentem Oberschwingungssystem ($v \neq 3n$) auch an den Leitungsimpedanzen auftritt, so dass die gesamte im Niederspannungsnetz entstehende relative Spannung ($c_{NS} = 2,0$)

$$k_{vNS} = \frac{U_{vNS}}{U_{nNS}/\sqrt{3}} = \frac{(Z_{vTNS} + Z_{vLNS})}{U_{nNS}/\sqrt{3}} \cdot \underline{\Sigma I}_v = \frac{c_{NS} \cdot Z_{vTNS}}{U_{nNS}/\sqrt{3}} \cdot \underline{\Sigma I}_v \quad (5b)$$

beträgt. Bei Transformatoren mit belastbarem Sternpunkt entspricht die homopolare Impedanz etwa der des positiven Systems $Z_{hT}/Z_{pT} \approx 1$; bei Leitungen beträgt dieses Verhältnis $Z_{hL}/Z_{pL} \approx 4$. Für ein homopolares Oberschwingungssystem ($v = 3n$) ergibt sich also $c_{NS} = 2 + n/z \approx 4,0$.

Nicht-homopolare Oberschwingungsströme werden praktisch ohne Reduktion in das Mittelspannungsnetz übertragen, $3n$ -fache Harmonische dagegen nur zu etwa 20%, da deren weitaus überwiegender homopolarer Anteil in den üblichen Ortsnetztransformatoren kurzgeschlossen wird. Der Anteil der Leitungen an der Impedanz des Mittelspannungsnetzes kann gegenüber dem Anteil des Transformators ($u_x \approx 15\%$; $u_r \approx 0,5\%$ [6]) in der Regel vernachlässigt werden, sofern keine Resonanz vorliegt. Im Mittelspannungsnetz entsteht dann unter der Annahme, dass einerseits alle unterlagerten Niederspannungsnetze in gleicher Weise mit Waschautomaten belastet sind und andererseits wegen der Vielzahl der Geräte eine Gleichverteilung ($p = 1/3$) auf die Aussenleiter gegeben ist, mit den Gln. (4a, c, d) und (5a) die relative Spannungsharmonische

$$k_{vMS} = \frac{U_{vMS}}{U_{nMS}/\sqrt{3}} = v \frac{(u_r + ju_x) U_{nMS}^2 \cdot c_{MS}}{S_{nTMS} \cdot U_{nMS}/\sqrt{3}} \cdot \frac{S_{nTMS}}{S_{HH}} \cdot s \cdot g_{max} \cdot p \cdot \bar{I}_v \cdot \frac{U_{nNS}}{U_{nMS}} = v \frac{(u_r + ju_x) U_{nNS}}{S_{HH}/\sqrt{3}} c_{MS} \cdot s \cdot g_{max} \cdot p \cdot \bar{I}_v \quad (5c)$$

mit

$$c_{MS} = 0,2 \text{ für } v = 3n \text{ bzw. } c_{MS} 1,0 \text{ für } v \neq 3n.$$

Die Oberschwingungsspannung der Hochspannungsebenen ist durch Wahl einer hohen relativen Kurzschlussspannung der Einspeisetransformatoren für die Mittelspannungsnetze in Gl. (5c) näherungsweise mit erfasst. Damit ergibt sich der insgesamt im Niederspannungsnetz wirksame Pegel der Spannungsharmonischen, die bei sehr ungünstigen Annahmen durch Waschautomaten verursacht werden können, zu

$$\underline{k}_v = \underline{k}_{vNS} + \underline{k}_{vMS} \quad (5d)$$

Die Gln. (4) und (5) sind in Tabelle I beispielhaft ausgewertet. Es zeigt sich, dass vor allem die dritte Harmonische

betroffen ist, die hauptsächlich im Niederspannungsnetz entsteht; im ungünstigsten Fall ist eine Zunahme um 3% zu erwarten, die jedoch nicht zeitgleich mit dem durch Fernsehgeräte verursachten Spannungspegel 3. Ordnung auftritt bzw. diesen teilweise kompensieren würde. Der Pegel der 5. Harmonischen erhöht sich durch die Waschautomaten nur geringfügig; auch hier ist eine lineare Überlagerung zu den bestehenden Pegeln nicht zu erwarten. Die Nennleistungen der Ortsnetztransformatoren haben nach Tabelle I auf die Pegel keinen nennenswerten Einfluss.

Insgesamt sind die Werte in Tabelle I zur ungünstigen Seite hin abgeschätzt, da sowohl maximale Gleichzeitigkeitsfaktoren angenommen wurden als auch davon ausgegangen wurde, dass aus dem Mittelspannungsnetz ausschliesslich Ortsnetze mit Haushaltlast versorgt werden. Das Ergebnis dürfte hinsichtlich des Verträglichkeitspegels in öffentlichen Netzen akzeptabel sein, da die Heizungen der Waschautomaten gleichzeitig für eine gute Netzämpfung sorgen.

Eine genauere Betrachtung der statistischen Verteilung der Summenströme und Spannungsbeiträge erscheint

Relative durch Waschautomaten mit Zündensatzsteuerung hervorgerufene Spannungsharmonische, die mit 95% Wahrscheinlichkeit nicht überschritten werden Tabelle I

v		3			5		
		100	400	1000	100	400	1000
S_{nT}/kVA	Gl.	100	400	1000	100	400	1000
$Z_{vTNS}/\text{m}\Omega$	(5a)	86+j240	18+j60	6+j24	143+j400	30+j100	10+j40
N	(4d)	57	228	570	57	228	570
n	(4c)	14	57	143	14	57	143
z	(4b)	9	27	58	9	27	58
$\Sigma I_v /\text{A}$	(4a)	6,0	18,1	38,9	1,0	3,0	6,4
φ_{Iv}°		-38	-38	-38	-23	-23	-23
$ k_{vNS} /\%$	(5b)	2,65	1,97	1,68	0,37	0,27	0,23
φ_{kv}°		32	35	38	47	50	53
$ k_{vMS} /\%$	(5c)	0,2	0,2	0,2	0,26	0,26	0,26
φ_{kv}°		50	50	50	65	65	65
$ k_v /\%$	(5d)	2,85	2,17	1,88	0,622	0,525	0,487
φ_{kv}°		34	37	40	54	57	59

bei der geringen Anzahl der in einem Niederspannungsnetz gleichzeitig betriebenen Waschautomaten (Tab. I) nicht sinnvoll; dagegen ist zu prüfen, ob einzelne während der Anlauf-Vorgänge auftretende transiente Harmonische der Waschautomaten, die an Netzausläufern hoher Impedanz betrieben werden, zu Störungen führen können.

3.2.3 Spannungspegel an Ausläufern von Niederspannungsnetzen

In Tabelle II sind die Stromgrenzwerte der Harmonischen 3. und 5. Ordnung nach [8] den tatsächlich maximal auftretenden Oberschwingungsströmen des untersuchten Waschmaschinenantriebs für den stationären und transienten Zustand gegenübergestellt. Nach [8] sind nicht die maximalen Augenblickswerte I_{vmax} mit den zulässigen Grenzwerten I_{vzul} zu vergleichen, sondern die von einem Messgerät mit einer Tiefpass-Zeitkonstante von $T_m = 1,5\text{ s}$ angezeigten Werte I_{vAnz} . Im stationären Betrieb werden die Grenzwerte eingehalten; nur die 3. Stromharmonische überschreitet sie während der Schleuderhochlaufvorgänge. Da allerdings nur durchschnittlich 27 Schleudervorgänge im Monat mit jeweils einer Beschleunigungszeit von maximal 5 s vorkommen, sind diese Überschreitungen an der Gesamtbetriebszeit T_B des Waschautomaten nur zu etwa $g_{\ddot{u}} = 0,2\%$ beteiligt. Die Auswirkung der Schleuderhochlaufvorgänge auf den durchschnittlichen Oberschwingungspegel im Netz kann also vernachlässigt werden.

Wie hoch die Wahrscheinlichkeit $P_{\ddot{u}}(q; z)$ ist, dass von z am gleichen Aussenleiter eines Netzes oder Netzausläufers betriebenen Waschautomaten mit Zündeinsatzsteuerung genau q den Stromgrenzwert bedingt durch Schleuderhochlauf überschreiten, lässt sich über die Binomialverteilung angeben:

$$P_{\ddot{u}}(q; z) = \binom{z}{q} \cdot g_{\ddot{u}}^q \cdot (1 - g_{\ddot{u}})^{z-q} \quad (6a)$$

Damit wird die Wahrscheinlichkeit, dass mehr als eines von insgesamt z Geräten den Grenzwert überschreitet,

$$P_{\ddot{u}}(q > 1; z) = 1 - P_{\ddot{u}}(0; z) - P_{\ddot{u}}(1; z) \quad (6b)$$

Die Gln. (6) sind in Tabelle III für übliche Baugrößen von Ortsnetztrans-

Zulässige und maximal gemessene Oberschwingungsströme eines Waschautomatenantriebs mit Zündeinsatzsteuerung

Tabelle II

v			3	5
VDE 0838 [8]	Grenzstrom Bezugsimpedanz	I_{vzul}/A Z_{vref}/Ω	2,30 0,85	1,14 1,31
stationär	max. Strom	I_{vmax}/A	1,60	0,75
Reversieren	max. Strom Hochlaufzeit Bewertung bewerteter Strom	I_{vmax}/A T_h/s $1 - e^{-T_h/T_m}$ I_{vAnz}/A	2,60 1,25 0,57 1,47	0,54 1,25 0,57 0,30
Schleudern	max. Strom Hochlaufzeit Bewertung bewerteter Strom	I_{vmax}/A T_h/s $1 - e^{-T_h/T_m}$ I_{vAnz}/A	6,00 1,25 0,57 3,39	1,40 1,25 0,57 0,79

formatoren ausgewertet; z ist dabei aus Tabelle I entnommen. Mit zwei oder mehr gleichzeitigen Schleuderhochläufen von Maschinen, die an demselben Leiter angeschlossen sind, ist danach praktisch nicht zu rechnen. Ein Netzausläufer mit hoher Impedanz speist meist eine noch geringere Zahl von Haushalten; entsprechend vermindert sich die Wahrscheinlichkeit weiter. Für die Berechnung der Spannungsharmonischen an einem solchen Netzpunkt hoher Impedanz braucht also nur der Einfluss eines Waschautomaten berücksichtigt zu werden. Beispielsweise kann im Fall der 3. Harmonischen, für die nach Tabelle II während des Schleuderhochlaufs eine Grenzwertüberschreitung vorliegt, die relative Spannung einen Wert von

$$k_3 = \frac{U_3}{U_{nNS}/\sqrt{3}} = \frac{Z_{3ref} \cdot I_{3max}}{U_{nNS}/\sqrt{3}} = \frac{0,85 \Omega \cdot 6 A}{231 V} = 2,2\% \quad (7)$$

Zeitliche Wahrscheinlichkeit für gleichzeitiges Auftreten von $q = 0; q = 1; q > 1$ Schleuderhochläufen bei an Ortsnetztransformatoren unterschiedlicher Baugröße angeschlossenen Waschautomaten

Tabelle III

S_{nT}/kVA	z	$P_{\ddot{u}}(q=0)/\%$	$P_{\ddot{u}}(q=1)/\%$	$P_{\ddot{u}}(q>1)/\%$
100	9	98,21	1,77	0,02
400	27	94,74	5,13	0,13
1000	58	89,04	10,34	0,61

erreichen. In Gl. (7) ist der kurzzeitig maximal auftretende Strom nach Tabelle II sowie die in [8] festgelegte Bezugsimpedanz

$$\underline{Z}_{vref} = (0,4 + jv \cdot 0,25) \Omega \quad (8a)$$

für $v = 3$ eingesetzt, die gut mit der für eine Beeinflussung massgebenden Impedanz am Verknüpfungspunkt mit dem öffentlichen Netz

$$\underline{Z}_{v6\%} \approx (0,42 + jv \cdot 0,24) \Omega \quad (8b)$$

nach [9] übereinstimmt; diese wurde im Jahr 1977 nur von 6% aller Anschlusspunkte in Niederspannungsnetzen der BRD überschritten. Eigene Impedanzmessungen in Niederspannungsnetzen mit Haushaltlast bestätigen die Gültigkeit der Näherungsgleichungen (8) bis zur Ordnung von etwa $v = 20$ [7]. Selbst wenn der «Grundpegel» der 3. Spannungsharmonischen im Netz bereits den nach [10, Tab. I] maximal zu erwartenden Pegel von 5% erreicht, so bleibt auch nach Erhöhung um 2,2% nach Gl. (7) ein ausreichender Abstand zum Grenzwert von 9% erhalten, der mit Rücksicht auf empfindliche elektronische Geräte und u. a. TFR-Empfänger auch kurzfristig nicht überschritten werden darf [11].

Die untersuchten Waschautomaten können also hinsichtlich ihrer Oberschwingungs-Netzurückwirkungen als unkritisch eingestuft werden.

4. Transiente Harmonische bei Industrieantrieben

4.1 Trajektorien

Auch beim Hochlauf eines Stromrichterantriebs an einem Walzgerüst ergeben sich Trajektorien. Da es sich hier um eine 12pulsige Schaltung handelt, sind neben der Trajektorie für die Grundschwingung eines Leiterstromes diejenigen für die 11. und 13. Harmonische dargestellt (Fig. 4 und 5).

Bei nahezu idealer Glättung des Gleichstromes im Lastkreis ist der Zündwinkel γ mit dem Phasenwinkel φ_1 des Grundschwingungsstromes identisch (Fig. 5a, b). Für die Winkel der Harmonischen gilt unter dieser Annahme

$$\varphi_v = v \cdot \varphi_1 \quad (9)$$

Aus den Änderungen zwischen den stationären Betriebszuständen in Figur 4 geht hervor, dass diese Beziehung jeweils gut erfüllt ist. Auch das bei guter Glättung im Gleichstromkreis bekannte Verhältnis der Beträge

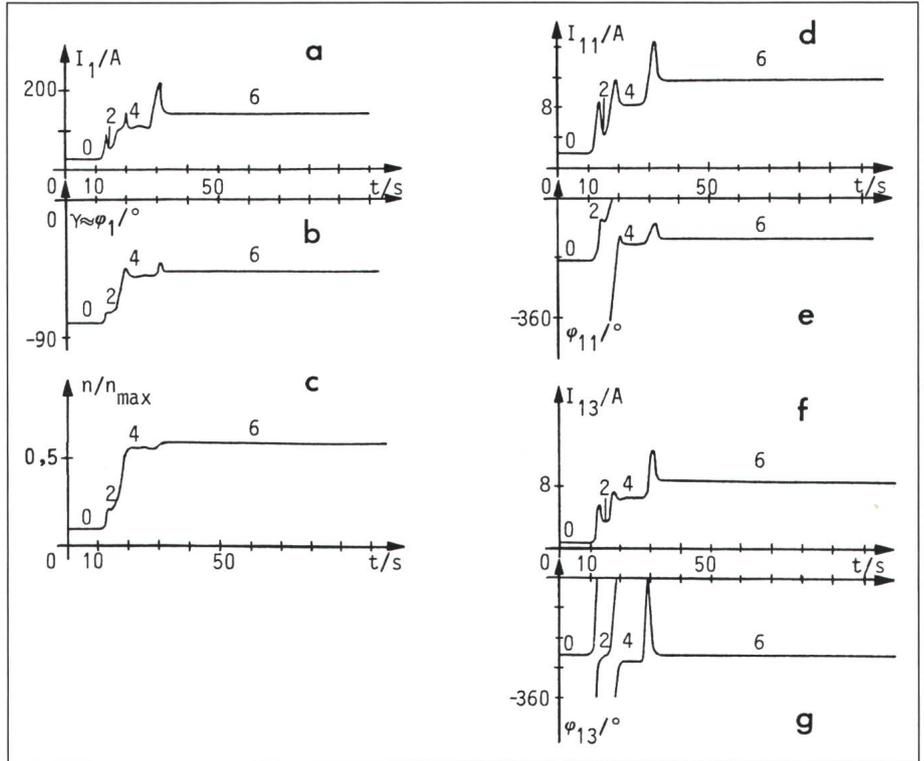


Fig. 5 Zeitverläufe beim Hochlauf eines Walzgerüsts mit 12pulsigem Stromrichterantrieb

- a Betrag des Grundschwingungsstromes
- b Phasenlage des Grundschwingungsstromes und Zündwinkel
- c relative Drehzahl
- d Betrag der 11. Stromharmonischen
- e Phasenlage der 11. Stromharmonischen
- f Betrag der 13. Stromharmonischen
- g Phasenlage der 13. Stromharmonischen

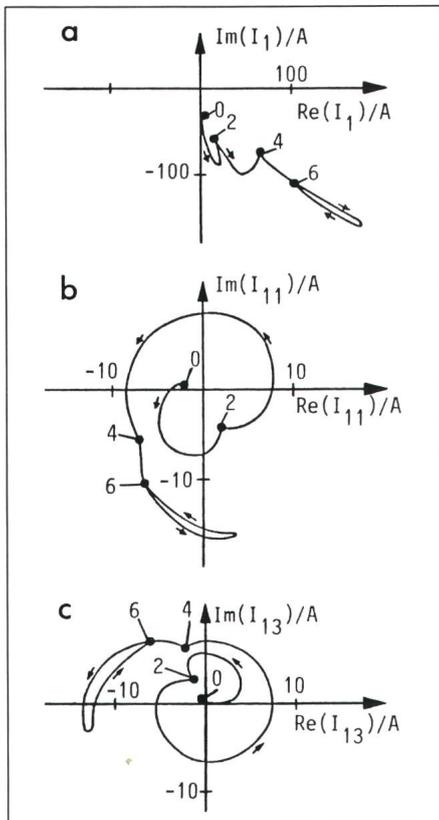


Fig. 4 Trajektorien beim Hochlauf eines Walzgerüsts mit 12pulsigem Stromrichterantrieb

- a für die Grundschwingung
 - b für die 11. Harmonische
 - c für die 13. Harmonische
- des Netzstromes
- $P_n = 4 \cdot 1,6 \text{ MW}$; $U_n = 30 \text{ kV}$

der Harmonischen im Netzstrom zu dem der Grundschwingung

$$I_v/I_1 = 1/v \cdot \frac{\sin(vu/2)}{v \cdot u/2} = (1/v) \cdot h_{vu} \quad (10)$$

wird nach Figur 6 bestätigt, wenn ein Kommutierungswinkel $u \leq 10^\circ$ berücksichtigt wird.

Bei einem Antrieb mit einer Leistung im MW-Bereich kann von einer relativ engen Kopplung der EMK des Motors mit der Speisespannung auf der Gleichstromseite ausgegangen werden. Die ohmschen Verluste sind im Vergleich zum Antrieb des Waschautomaten verhältnismässig gering. Deshalb kann die Drehzahl n aus dem mit dem Grundschwingungs-Phasenwinkel φ_1 identischen Zündwinkel γ abgeschätzt werden:

$$n/n_{\max} \approx U_{d\gamma}/U_d \approx \cos \gamma \approx \cos \varphi_1 \quad (11)$$

Aus Figur 4a ergibt sich, dass sich die Drehzahl in den stationären Bereichen 2 und 4 näherungsweise um den

Faktor 4 bzw. 9 gegenüber der Anfangsdrehzahl (Bereich 0) vergrössert hat, während beim Übergang von Bereich 4 in den Bereich 6 bei nahezu

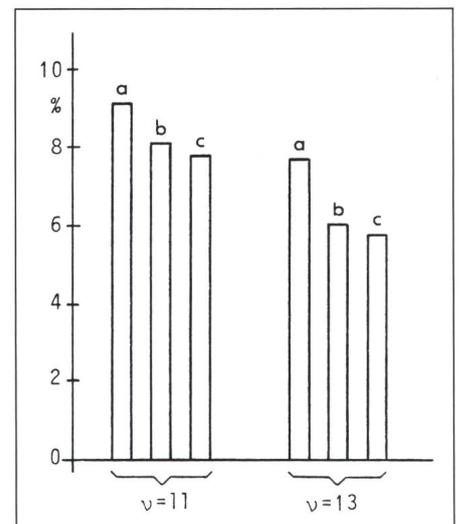


Fig. 6 Relative Stromharmonische einer Walzstrasse

- a $1/v$ «idealer» Wert
- b I_v/I_1 eines Walzgerüsts
- c I_v/I_1 einer Walzstrasse

konstanter Drehzahl in erster Linie das an der Welle abgegebene Moment und damit der Strom angewachsen ist (Einlaufen des Walzgutes).

4.2 Überlagerung

In Figur 6 sind die zeitgleich gemessenen relativen Stromharmonischen an der Einspeisung der Walzstrassen-Sammelschiene sowie am Abgang zu einem einzelnen Walzgerüst einander gegenübergestellt. Aus dem Vergleich der an den beiden Messorten aufgenommenen Ströme ergibt sich näherungsweise der für diese Walzstrasse gültige Summationsfaktor

$$h_v = \frac{(I_v/I_1)_{\text{Schiene}}}{(I_v/I_1)_{\text{Gerüst}}} = \begin{cases} 0,97 & \text{für } v = 11 \\ 0,96 & \text{für } v = 13 \end{cases} \quad (12)$$

Aus diesen hohen Summationsfaktoren bei Antrieben, die durch das Produktionsgut miteinander mechanisch gekoppelt sind, darf allerdings nicht gefolgert werden, dass die Stromharmonischen eines ganzen Walzwerkes sich entsprechend $I_v/I_1 = 1/v$ einstellen. Beispielsweise sind folgende Minderungsfaktoren wirksam:

- die Antriebe waren während einer Beobachtungszeit von 8 h durchschnittlich nur zu etwa $P/P_n \approx 90\%$ ausgelastet;
- die durchschnittliche Einschalt-dauer der Antriebe betrug produktionsbedingt nur etwa $T_B/T \approx 60\%$;
- nur etwa $|I_{v, \text{Netz}}/\Sigma I_v| \approx 70\%$ der sich aus idealisierter Rechnung ergebenden Stromharmonischen aus den Antrieben fließen in das überlagerte Netz, da die zur Netzimpedanz parallel geschaltete Ersatzimpedanz der Stromrichter und aller Hilfsantriebe im Werk etwa 30% des eingespeisten Oberschwingungsstromes aufnimmt;
- verschiedene Walzstrassen innerhalb des Werkes werden im allgemeinen produktionsbedingt mit unterschiedlichen relativen Drehzahlen betrieben; daraus ergibt sich z. B. für $v = 11 \dots 13$ ein Summationsfaktor über das gesamte Werk von $h_{v, \text{ges}} \approx 0,8 \dots 0,5$ [12]; dieser Faktor sinkt mit zunehmender Anzahl gleichzeitig betriebener Produktionsstrassen sowie mit der Ordnung der Harmonischen;
- der Kommutierungsvorgang der Stromrichter sowie nichtideale Glättung im Gleichstromkreis reduzieren die eingepprägten Oberschwingungsströme der Ordnungen 13 und 11 auf näherungsweise $h_{v, \text{vu}} \approx 0,79 \dots 0,88$.

Der resultierende Reduktionsfaktor für Oberschwingungsströme der Ord-

nung 11 und 13 ergibt sich somit als Produkt dieser Einflussfaktoren zu etwa

$$H \approx P/P_n \cdot T_B/T \cdot |I_{v, \text{Netz}}/\Sigma I_v| \cdot h_{v, \text{ges}} \cdot h_{v, \text{vu}} \approx 0,15 \dots 0,27 \quad (13)$$

Dieses Ergebnis wird durch Messungen in dem beschriebenen Walzwerk bestätigt [12].

Wegen des gemeinsamen Hochlaufs aller Walzgerüste kann die Überlagerung der transienten und stationären Ströme für die gesamte Strasse entsprechend den Gln. (1)...(3) erfolgen; wegen des grossen Winkelbereichs der Trajektorien ist allerdings der Einfluss der transienten Zustände auf den zeitlichen Durchschnittswert gering. Für den Einfluss der Hochlaufströme auf die Oberschwingungsspannungspegel im Werk bzw. im speisenden Netz empfiehlt sich daher die deterministische Betrachtung einer einzelnen Walzstrasse entsprechend Kap. 3.2.3.

5. Bewertung transienter Harmonischer

Für die Messung von Oberschwingungsströmen wird in [8] ein Messgerät mit Verzögerungsverhalten 1. Ordnung bei einer verhältnismässig grossen Zeitkonstanten von etwa $T_m = 1,5$ s vorgeschrieben, um auch bei Verwendung sehr unterschiedlicher Messgeräte einheitliche Messergebnisse zu erzielen. Während der Zeit T_h in konstanter Höhe auftretende Stromeffektivwerte $I_{v, \text{max}}$ werden also entsprechend

$$I_{v, \text{Anz}} = I_{v, \text{max}} (1 - e^{-T_h/T_m}) \quad (14)$$

angezeigt. Der auf diese Weise «bewertete» Strom z. B. während des Schleuderhochlaufs des Waschautomaten überschreitet den zulässigen Grenzwert mit 47% nun erheblich weniger als bei direkter Messung (Tab. II). Das Messverfahren gibt also in diesem Falle die Tatsache richtig wieder, dass mit Störauswirkungen kaum zu rechnen sein wird. Es sind allerdings Verbraucher denkbar, bei denen transiente Stromharmonische in wesentlich grösserer Höhe, dafür aber nur sehr kurzfristig auftreten, z. B. bei sehr rasch reversierenden Motoren an Werkzeugmaschinen. Da auf internationaler Ebene vorgeschlagen wurde, für transiente Harmonische das 1,5fache des stationären Grenzwertes zuzulassen, wäre der als noch «erlaubt» geltende transiente Spannungspegel $U_{v, \text{zul}}$

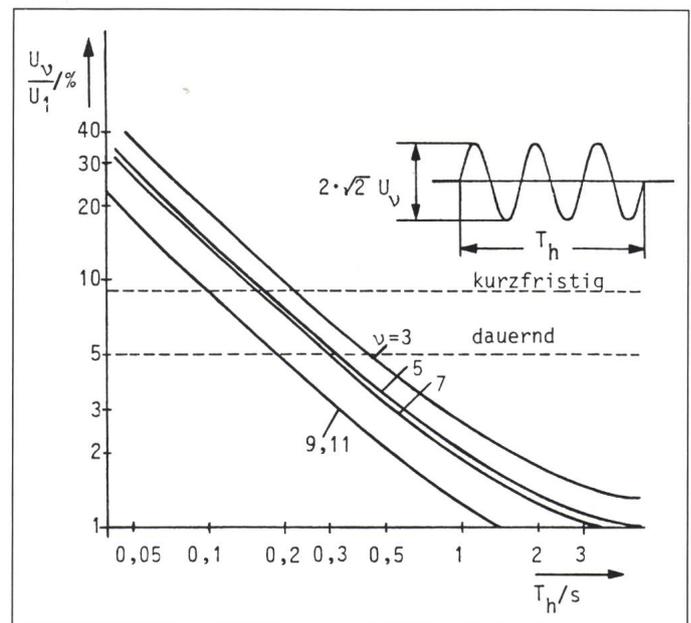
$$U_{v, \text{zul}} = U_{v, \text{Anz}} = Z_{v, \text{ref}} \cdot 1,5 \cdot I_{v, \text{Anz}} \quad (15a)$$

Die tatsächlich auftretende, als noch zulässig bewertete Grenzspannung U_v würde mit den Gln. (14) und (15a) u. U. jedoch wesentlich grösser:

$$U_v = \frac{U_{v, \text{Anz}}}{1 - e^{-T_h/T_m}} = \frac{1,5 \cdot Z_{v, \text{ref}} \cdot I_{v, \text{Anz}}}{1 - e^{-T_h/T_m}} \quad (15b)$$

In Figur 7 ist die nennwertbezogene Grenzspannung U_v/U_1 für $v = 3 \dots 11$

Fig. 7
Als zulässig bewertete relative Spannungsharmonische U_v/U_1 in Abhängigkeit von ihrer Dauer T_h , verursacht durch Ströme I_v an der Referenzimpedanz $Z_{v, \text{ref}}$ nach [8]



nach Gl. (15b) dargestellt. Für kleine Hochlaufzeiten $T_h \leq 0,23$ s wird der kurzfristig zulässige Grenzwert nach [11] zum Teil erheblich überschritten; hier sind Störungen zu befürchten.

Für $T_h \leq 0,57$ s kann dieser Grenzwert dann überschritten werden, wenn bereits der nach [11] dauernd zulässige Grundpegel vorhanden ist; grössere Zeiten T_h dürften unproblematisch sein.

Für eine Neu-Festlegung der Messvorschriften auf internationaler Ebene erscheint es daher geboten, bei transienten Harmonischen zwischen Messung (Zeitkonstante $T_m \leq 0,05$ s) und Bewertung ($T_m = 1,5$ s) zu unterscheiden, um solch kritische Fälle überhaupt erkennen zu können. Ferner

sollte bei der Bewertung von Oberschwingungsemissionen besonders auch der «kritische» Bereich $T_h \leq 0,6$ s limitiert werden, z. B. dadurch, dass bei Messung mit $T_m = 0,05$ s die Differenz zwischen Kurzzeit- und Dauerwert nach [11] an der Referenzimpedanz nach Gl. (8a) nicht überschritten werden darf.

Literatur

- [1] Energiebericht der Elektroindustrie. Frankfurt/M., Zentralverband der Elektrotechnischen Industrie e. V. (ZVEI), 1980.
- [2] R. Gretschnick und G. Krost: Betrags- und winkelrichtige Messung von Spannungs- und Stromharmonischen. ETZ-Archiv 3(1981)5, S. 149...152.
- [3] S.D. Stearns: Digitale Verarbeitung analoger Signale. München/Wien, Oldenbourg-Verlag, 1979.

- [4] R. Gretschnick, G. Krost und T. Stiller: Netzrückwirkungen durch transiente Oberschwingungen. Elektrizitätswirtschaft 84(1985)20, S. 799...802.
- [5] R. Gretschnick: Einteilung der Hausgeräte hinsichtlich ihrer Störaussendung in verschiedene Klassen. AK «Klassierung» im DKE-UK 763.1. Oktober 1983.
- [6] H. Happoldt und D. Oeding: Elektrische Kraftwerke und Netze. 5. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1978.
- [7] G. Krost: Frequenzabhängige Impedanzen von Verbrauchern, Niederspannungs- und Mittelspannungsnetzen. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 1983.
- [8] Begrenzung von Rückwirkungen in Stromversorgungsnetzen, die durch Elektrogeräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke mit elektronischen Steuerungen verursacht werden. DIN EN 50006/VDE 0838/10.76.
- [9] B. Zube: Begrenzung von Rückwirkungen in Stromversorgungsnetzen. ETZ-B 30(1978)18, S. 736...740.
- [10] M.A. Pesonen: Harmoniques, paramètres caractéristiques, méthodes d'étude, estimation de valeurs existantes en réseau. Electra CIGRE (1981)77, p. 35...54.
- [11] Ausrüstung von Starkstromanlagen mit elektronischen Betriebsmitteln. VDE-Bestimmung. VDE 0160/11.81.
- [12] H. Schmidt: Netzrückwirkungen in einem Industriernetz mit einem hohen Anteil an Stromrichterleistung. ETZ-A 98(1977)5, S. 341...345.