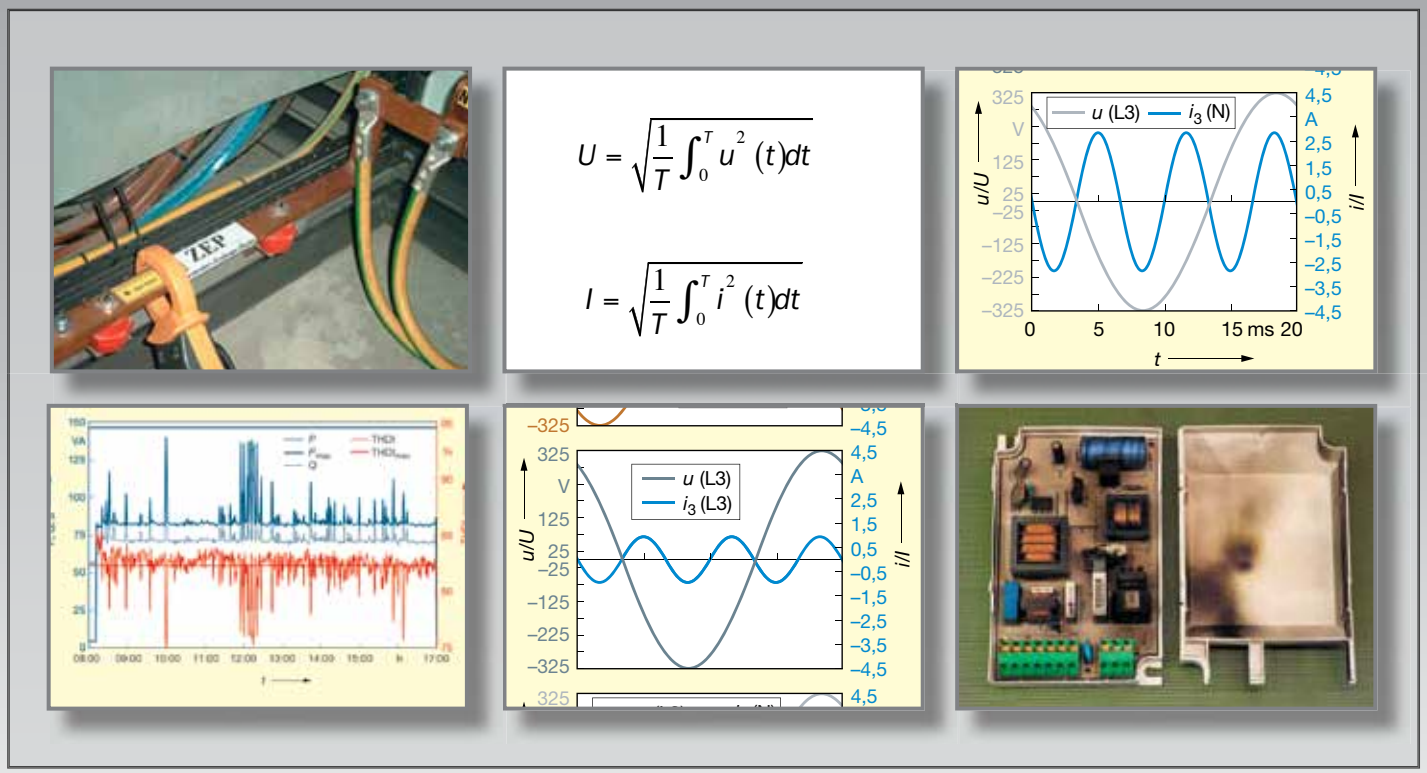
www.elektropraktiker.de ISSN 0013-5569 · 06352 · HUSS-MEDIEN GmbH · 10400 Berlin
€ 15,00

ELEKTRO PRAKTIKER
THEMA

Analyse und Auswirkungen

Ober-schwingungen



Beitragsserie aus der Fachzeitschrift ELEKTROPRAKTIKER

Teil 1: Grundlagen

Teil 2: Quantifizierung (THD) und Auswirkungen

Teil 3: Auswirkungen auf Neutralleiter, Drehfeld-motoren und Trafos

Teil 4: Rückwirkung von Generatoren, Einfluss auf Kondensatoren, Betriebs-ströme, Auswirkung im Mittelspannungsnetz

Teil 5: Abhilfemöglichkeiten auf Netz- und Geräteseite

Teil 6: Die Normensituation

Teil 7: Schlussbetrachtung

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

Analyse und Auswirkungen von Oberschwingungen

Teil 1: Grundlagen

S. Fassbinder, Düsseldorf

So genannte Oberschwingungen oder auch Harmonische entstehen vorwiegend beim Betrieb elektronischer Betriebsmittel an Wechsel- und Drehstromnetzen. Sie stellen für diese Netze eine zusätzliche und neuartige Beanspruchung dar, für die sie folglich auch nicht ausgelegt waren, was schon für Überraschungen wie Korrosion z. B. am Fundamenterder oder an Wasserrohren sorgte. PC-Netzwerke blieben um mehrere Größenordnungen hinter den versprochenen „Gigabits“ zurück und stürzten ab. Manchmal wurden Neutralleiter heiß, in extremen Einzelfällen bis zum Brand, obwohl doch jede Elektrofachkraft weiß, dass sie einphasige Lasten nur zu gleichen Teilen auf die drei Außenleiter eines Drehstromnetzes verteilen muss, und schon ist der Neutralleiter stromlos. Eben das aber funktioniert heute nicht mehr unbedingt. Dieser Beitrag bietet daher Detailkenntnisse zu Ursachen, Zusammenhängen und Lösungsmöglichkeiten.

1 Oberschwingungen – was ist das überhaupt?

Manche meinen vielleicht noch immer, Oberschwingungen gingen von Trunkenheit des Personals in der Gastronomie aus – doch mitnichten. Erheblich mehr haben sie mit den aus der Musik bekannten Obertönen zu tun, weswegen sie auch als „Harmonische“ bezeichnet werden, obschon sie im Netz für allerlei Disharmonie sorgen können – aber keineswegs müssen, und darum geht es.

Autor
Dipl.-Ing. *Stefan Fassbinder* ist Berater für elektrotechnische Anlagen beim Deutschen Kupferinstitut (DKI), Düsseldorf.

1.1 Die Mathematik dahinter

Ihnen liegt das Prinzip zu Grunde, dass sich jeder zwar periodische, nicht jedoch sinusförmige Vorgang durch eine theoretisch unendliche Summe sinusförmiger Vorgänge zusammensetzen lässt, wie der französische Mathematiker *Jean-Baptiste-Joseph Fourier* (1768 – 1830) im Jahre 1822 herausfand. Während es damals noch fast keinen elektrischen Strom gab, findet diese Entdeckung heute ihre wohl bedeutendste praktische Anwendung in der Elektrotechnik. Die so genannte und unten an zwei Beispielen dargestellte **Fourier-Analyse** einer beliebigen, periodisch verlaufenden Kurvenform besagt demnach, dass eine jede solche Funktion aus sinusförmigen Teilschwingungen besteht. Es sind dies die Grundschwingung, die den sinusförmigen Anteil gleicher Frequenz (Grundfrequenz) der betreffenden Funktion hat, und die Oberschwingungen, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache hiervon sind. Den ganzzahligen Faktor, um den sich die Frequenz einer Teilschwingung von der Grundschwingungsfrequenz unterscheidet, nennt man die Ordnung oder Ordnungszahl der jeweiligen Teilschwingung. Die Grundschwingung hat somit die Ordnungszahl 1.

In Bild ❶ wurde ein dreieckförmiger, in Bild ❷ ein rechteckiger Stromverlauf einer Frequenz von jeweils 50 Hz aus seiner Grundschwingung und seinen Oberschwingungen zusammengesetzt. Beiden Fällen sind zwei Beobachtungen gemein:

- In beiden Verläufen sind Harmonische gerader Ordnungszahlen nicht enthalten. Die kleinste jeweils vorkommende Harmonische ist somit die 3. mit ihrer Frequenz von 150 Hz. Dies ist typisch für die meisten technisch vorkommenden Kurvenformen.
- In beiden Fällen nehmen die Amplituden der einzelnen Oberschwingungen von einer Ordnungszahl zur nächsthöheren kontinuierlich ab. Dies ist immer so, abgesehen vom gänzlichen Fehlen der geradzahligen Anteile. Folglich kann man für technische Zwecke, abhängig von der erforderlichen Genauigkeit, das Zusammenzählen der Oberschwingungen bei einer bestimmten Ordnungszahl abbrechen. Im Beispiel wurde in beiden Fällen bis zur 17. gerechnet.

Daneben gibt es aber auch einige Abweichungen zwischen beiden Fällen. Zur Veranschaulichung wurden die Werte zusätzlich in Tafel ❶ und Tafel ❷ einander numerisch gegenüber gestellt. Die Amplituden der beiden Beispielkurven wurden so gewählt, dass sich in jedem Fall ein theoretischer Gesamt-Effektivstrom von 1 A ergibt. Beim voll ausgetasteten Rechteckstrom (der nicht ‚lückt‘, also keine ‚Pausen‘ um die Nulldurchgänge aufweist)

Mit epPLUS Fachinformationen finden, wenn sie gebraucht werden!

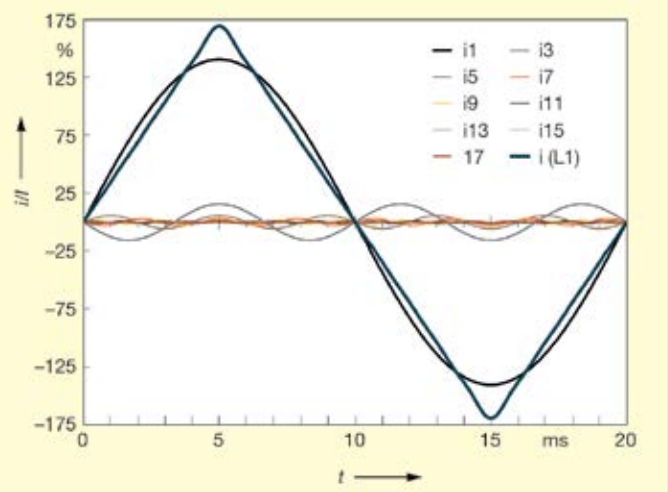
Lesen Sie u.a.:

- 126 Fachartikel zum Thema Oberschwingungen
- 32 Fachartikel zum Thema EMV und
- 149 Fachartikel zum Thema Schutzmaßnahmen und -einrichtungen

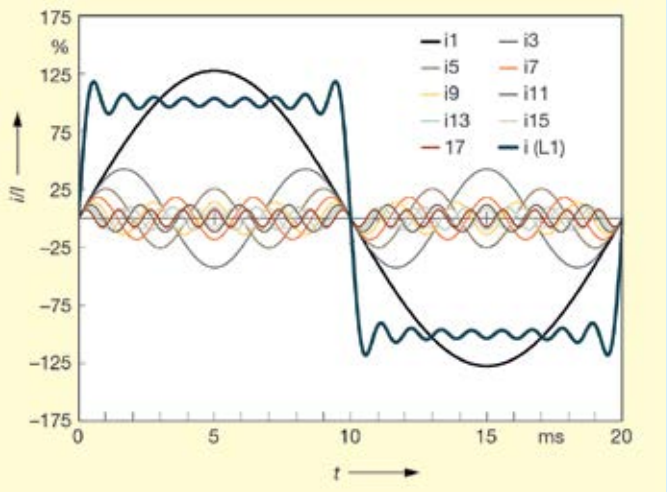
Mehr unter www.elektropraktiker.de

epPLUS – das Online-Nachschlagewerk für die Elektrotechnik

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)



❶ **Grafische Synthese eines Dreieckstroms (dick, dunkelblau) aus der Grundschwingung (schwarz) und den Oberschwingungen 3 bis 17**



❷ **Grafische Synthese eines Rechteckstroms (dick, dunkelblau) aus der Grundschwingung (schwarz) und den Oberschwingungen 3 bis 17**

Quellen: S. Fassbinder, ep

entspricht dies natürlich einem Scheitelwert von ebenfalls 1 A – denn was heißt schon „Scheitel“ bei einem Rechteck?

Bei der Dreieckform beträgt der Faktor immer $1/\sqrt{3}$, wie sich in Formelsammlungen nachlesen lässt. In den beiden Tafeln wurden jeweils die Effektivwerte der darzustellenden Summenkurven im Bereich bis zur Ordnungsnummer 17 zusammengezählt. Die Addition erfolgt „pythagoräisch“; der Gesamt-Effektivwert errechnet sich also, wie immer bei der Überlagerung mehrerer Frequenzen, indem man die einzelnen Werte quadriert, die Quadrate addiert und aus der Summe wieder die Wurzel zieht. Ein Minuszeichen bedeutet lediglich, dass die betreffende Harmonische mit einer negativen Halbschwingung beginnt, obwohl die Grundschwingung mit einer positiven Sinus-Halbschwingung anfängt. Beim Quadrieren scheiden die Minuszeichen dann dahin: Auf den Effektivwert des Gesamtstroms wirken sie sich nicht aus. Die so errechneten Effektivwerte wurden farblich hervorgehoben. Folgende Unterschiede fallen dabei auf:

- Man erkennt, dass in Tafel ❶, auf 3 Kommastellen genau gerechnet, mit 17 Harmonischen dieser Wert genau erreicht wird, in Tafel ❷ dagegen nicht. Man hätte hier noch weitere Oberschwingungen berücksichtigen müssen, um zur gleichen Genauigkeit zu gelangen.
- Man erkennt das Gleiche auch in den Diagrammen: In Bild ❷ sind die gleichen Oberschwingungen enthalten wie in Bild ❶; in Bild ❷ jedoch ist jede einzelne von ihnen stärker vertreten als diejenige entsprechender Ordnung in Bild ❶.
- Auch optisch ist dieser Unterschied wahrnehmbar: Während in Bild ❶ die Synthese der Dreieckskurve recht gut gelungen ist, fehlt in Bild ❷ noch ziemlich viel bis hin zu etwas, was sich mit einigem Recht „Rechteck“ hätte nennen dürfen.

1.2 Die anschauliche Vorstellung

Und das ist kein Zufall; fügt sich doch die ‚Zielkurve Dreieck‘ schon einigermaßen ‚harmonisch‘ in die Sinuskurve der Grundschwingung hinein. Was nun noch in Form von Oberschwingungen beschrieben werden muss, ist die Differenz zwischen beiden – und das ist hier nicht besonders viel.

Ganz anders sieht die Sache im zweiten Fall aus: Das Rechteck ist weit davon entfernt, Ähnlichkeiten mit seiner eigenen Grundschwingung, also einer Sinusschwingung gleicher Frequenz und ähnlicher Amplitude, aufzuweisen. Entsprechend groß ist die durch Oberschwingungen aufzufüllende Differenz.

Tatsächlich sind die Oberschwingungen kein Gedankenkonstrukt der Mathematiker, sondern existieren wirklich und wahrhaftig physisch im Draht, wo sie sich messen und durch entsprechende Schaltungen auch z. B. voneinander trennen lassen, sodass sie von dort an einzeln in separaten Drähten weiter fließen.

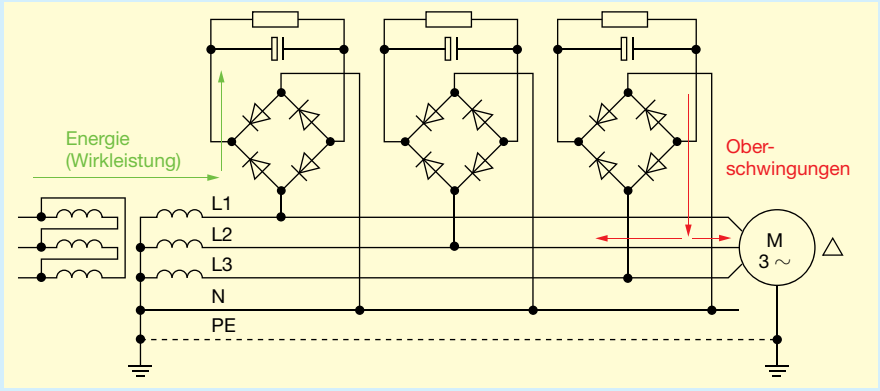
Umgekehrt bedeutet dies aber wiederum nicht, dass sich – noch vor der Trennstelle – ein Elektron im selben Moment von links nach rechts bewegt, in dem sich ein anderes von rechts nach links bewegt, auch wenn eine Oberschwingung zum selben Zeitpunkt einen negativen Augenblickswert haben kann, in dem eine andere gerade positiv ist.

Hinter der Trennstelle dagegen können sehr wohl die Augenblickswerte der einzelnen Ströme in den einzelnen Leitern unterschiedliche Vorzeichen haben. Vergleichbar ist diese Situation derer in den drei Neutralleitern, werden diese separat zum Sternpunkt zurück geführt statt bis zum Punkt der Aufteilung in Einphasen-Stromkreise einen gemeinsamen Neutralleiter zu legen. Die typischen Merkmale und Auswirkungen einer jeden der einzelnen Frequenzen sind aber auch vorher schon, im

Tafel ❶ Rechnerische Synthese eines Dreieckstroms aus der Grundschwingung und den Harmonischen 3 bis 17

Errechnete Werte		**Quadratwerte**			**Fourier-Koeffizienten (Scheitelwerte)**
Echt-Effektivwert: I_{eff} **= 1,0000 A** **Betrags-Mittelwert:** i_{AV} **= 0,8660 A**		Dreieck	gesamt	nur für THD	
Grundschwingung:	I_1 = 0,9927 A	I_1^2 =	0,9855 A²	0,0000 A²	1,4039 A
3. Oberschwingung:	I_3 = – 0,1103 A	I_{3^2} =	0,0122 A²	0,0122 A²	– 0,1560 A
5. Oberschwingung:	I_5 = 0,0397 A	I_5^2 =	0,0016 A²	0,0016 A²	0,0562 A
7. Oberschwingung:	I_7 = – 0,0203 A	I_7^2 =	0,0004 A²	0,0004 A²	– 0,0287 A
9. Oberschwingung:	I_9 = 0,0123 A	I_9^2 =	0,0002 A²	0,0002 A²	0,0173 A
11. Oberschwingung:	I_{11} = – 0,0082 A	I_{11}^2 =	0,0001 A²	0,0001 A²	– 0,0116 A
13. Oberschwingung:	I_{13} = 0,0059 A	I_{13}^2 =	0,0000 A²	0,0000 A²	0,0083 A
15. Oberschwingung:	I_{15} = – 0,0044 A	I_{15}^2 =	0,0000 A²	0,0000 A²	– 0,0062 A
17. Oberschwingung:	I_{17} = 0,0034 A	I_{17}^2 =	0,0000 A²	0,0000 A²	0,0049 A
Summe der Quadrate:		ΣI_n^2 =	1,0000 A²	0,0144 A²	
Wurzel hieraus:			1,0000 A	0,1202 A	
THDR (r: root mean square):		0,120 A/0,999 A = 12,0 %			
THDF (f: fundamental):		0,120 A/0,992 A = 12,1 %			

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)



Quelle: S. Fassbinder, ep

❸ **Oberschwingungen fliessen „stromaufwärts“**

gemeinsamen Draht vor der Aufteilung, gleichzeitig nachweisbar. Das macht die Vorstellung dessen, was wirklich im Draht abläuft, ein wenig schwierig.

Oberschwingungen entstehen durch nichtlineare Lasten. Dies sind – wiederum anschaulich dargestellt – solche, deren Impedanzen nicht konstant sind, sondern sich mehrmals je Periode des Wechselstromnetzes ändern. Man denke z. B. an eine einfache Diode:

In dem Moment, in dem sich der Strom umkehrt, ändert sich die Impedanz nahezu schlagartig von einem sehr niedrigen zu einem sehr hohen Wert oder umgekehrt.

Dies und viele ähnliche Zusammenhänge werden Gegenstände der folgenden Ausführungen sein.

2 Spannungen oder Ströme?

Die Spannung, die Kraftwerks-Generatoren, in der Regel Drehstrom-Synchronmaschinen, erzeugen, ist im Prinzip sinusförmig. Dies ergibt sich ganz einfach daraus, dass diese Spannung durch eine Rotationsbewegung erzeugt wird. Der vermehrte Einsatz kleinerer dezentraler Einheiten – Stichwort Energiewende – ändert daran zunächst einmal wenig, solange diese Maschinen direkt am Netz laufen (Blockheizkraftwerke). Bei solchen, die über elektronische Umrichter (Wind) bzw. Wechselrichter (Sonne) einspeisen, bemüht man sich mit ebenfalls elektronischen Mitteln, die Sinusform so gut wie möglich – nein, eher so schlecht wie es gerade mal ausreicht, um die Mindestforderungen in den Normen zu erfüllen – wieder herzurichten (Abschnitt 5.2.2).

Tatsache bleibt jedoch, solange es noch rotierende Maschinen im Kraftwerkspark gibt, dass die magnetisch erzeugte Spannung proportional zur Änderungs-Geschwindigkeit des magnetischen Flusses in der Hauptwicklung der betreffenden Maschine ist. Der magnetische Fluss in der Hauptwicklung ist proportional zum Kosinus des Winkels zwischen dieser und der Erregerwicklung. Die Änderungs-Geschwindigkeit dieses magnetischen Flusses ist somit proportional zum Sinus des Winkels zwischen den Wicklungen. Fertig ist die Sinusspannung – sofern die Drehzahl keinen schnellen Schwankungen

Tafel ❷ Rechnerische Synthese eines Rechteckstroms aus der Grundschwingung und den Harmonischen 3 bis 17

Errechnete Werte		**Quadratwerte**			**Fourier-Koeffizienten (Scheitelwerte)**
Echt-Effektivwert:	I_{eff} = 0,9887 A	Rechteck	gesamt	nur für THD	
Betrags-Mittelwert:	i_{AV} = 1,0000 A				
Grundschwingung:	I_1 = 0,9003 A	I_1^2 =	0,8106 A²	0,0000 A²	1,2732 A
3. Oberschwingung:	I_3 = 0,3001 A	I_3^2 =	0,0901 A²	0,0901 A²	0,4244A
5. Oberschwingung:	I_5 = 0,1801 A	I_5^2 =	0,0324 A²	0,0324 A²	0,2546 A
7. Oberschwingung:	I_7 = 0,1286 A	I_7^2 =	0,0165 A²	0,0165 A²	0,1819 A
9. Oberschwingung:	I_9 = 0,1000 A	I_9^2 =	0,0100 A²	0,0100 A²	0,1415 A
11. Oberschwingung:	I_{11} = 0,0818 A	I_{11}^2 =	0,0067 A²	0,0067 A²	0,1157 A
13. Oberschwingung:	I_{13} = 0,0693 A	I_{13}^2 =	0,0048 A²	0,0048 A²	0,0979 A
15. Oberschwingung:	I_{15} = 0,0600 A	I_{15}^2 =	0,0036 A²	0,0036 A²	0,0849 A
17. Oberschwingung:	I_{17} = 0,0530 A	I_{17}^2 =	0,0028 A²	0,0028 A²	0,0749 A
Summe der Quadrate:		$\sum I_n^2$ =	0,9775 A²	0,1669 A²	
Wurzel hieraus:			0,9887 A	0,4086 A	
THDR (r: root mean sqare)		0,408 A/0,988 A = 41,3 %			
THDF (f: fundamental)		0,408 A/0,900 A = 45,4 %			

ep-Sonderheft

Blitz- und Überspannungs-schutz

NEU!

Lesen Sie darin praxisnahe Fachartikel zu den Themen:

- Normen und Vorschriften: Blitzschutz-Normenreihe DIN EN 62305:2011 Fundamenterder – Neuausgabe der DIN 18014
- Blitzschutzmaßnahmen: Erfahrungen beim Prüfen von Blitzschutzsystemen
- Blitz- und Überspannungs-Schutzgeräte und
- Leser fragen – Experten antworten darunter: Überspannungsschutz hinter einer FI-Schutzeinrichtung
- u. v. m.

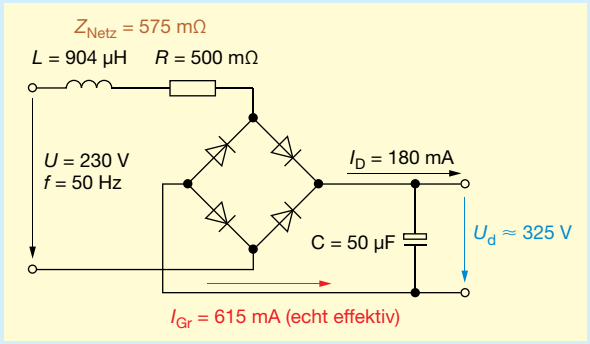
Auch als digitale Version erhältlich! 15,– €

Jetzt bestellen!

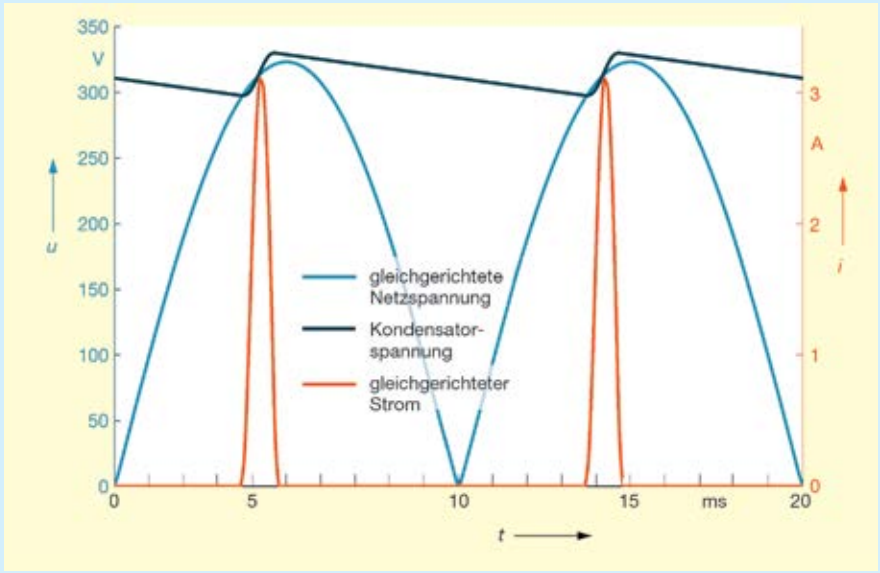
www.elektropraktiker.de/sonderhefte

oder über den Bestellschein hinten im Heft.

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)



❹ Schaltung und Parameter zu Bild 5



Quellen: S. Fassbinder, ep

❺ Sich rechnerisch ergebende Kurvenverlaeufe der Kondensatorspannung und des gleichgerichteten Netzstroms aus Bild 3

unterliegt und das Feld homogen ist. Für Ersteres sorgt das Massenträgheitsmoment; um Zweiteres bemüht man sich bestens, aber letztlich gleichen sich kleine Unregelmäßigkeiten bei der Vielzahl an Maschinen gegenseitig aus.

Fazit: Die induzierte Spannung, also sozusagen ‚die Leerlaufspannung des Netzes', kommt dem Schönheits-Ideal der Sinusschwingung [lat. sinus = Busen] schon sehr nahe. Die Abweichung läge, liefe denn das Netz jemals leer, deutlich unter 1 %.

Oberschwingungen treten zunächst nur im Strom auf: Wie beschrieben, verändert eine nicht lineare Last ihre Impedanz abhängig vom Punkt der Phase (z. B. Dimmer, Abschnitt 3.2) bzw. vom Augenblickswert der Spannung (Abschnitt 3.1) oder des Stroms (z. B. eine Diode, einzeln für sich betrachtet, oder eine Gas-Entladung). Dadurch werden die Stromverläufe gegenüber dem Verlauf der sie treibenden Spannung verzerrt. Nur durch die nie ganz vermeidbaren Impedanzen im Netz, also über die Spannungsfälle, übertragen sich diese Verzerrungen auch auf die Spannung.

Folgende Punkte sind in diesem Zusammenhang hervorzuheben:

- Nur bei falschem mechanischem oder elektrischem Aufbau der Netze (s. Abschnitt 6) stellen die verzerrten Ströme an sich schon ein Problem dar. Nur indirekt wird hierdurch auch die Kurve der Spannung ‚verbeult'. Das Ausmaß dieser Verformungen wird teilweise durch Normen ‚geregelt' [1], sofern man dies denn so nennen kann.
- Eine Äußerung wie „Dieses Netz hat so und so viel Verzerrungsgehalt" muss sich immer auf die Spannung beziehen. Beim Strom ist die pauschale Angabe eines Wertes für den Verzerrungsgehalt unmöglich. Dieser hängt vielmehr von den am jeweiligen Endstromkreis betriebenen Verbrauchern ab.
- Umgekehrt beeinflussen die Parameter des Netzes das Ausmaß an Harmonischen im speisenden Strom einzelner Endgeräte. **Der Oberschwingungsgehalt ist also auch in Bezug auf das einzelne Gerät keine fixe, unabhängige Größe!**
- Oberschwingungen fließen also gleichsam **‚stromaufwärts' vom Endgerät hin zur speisenden Energiequelle** (Bild ❸) – entgegen der (bislang in der konventionellen Stromversorgung üblichen) Energierichtung vom Großkraftwerk zum Kleingerät!
- Da die inneren Impedanzen der Netze in der Regel um eine bis zwei Größenordnungen niedriger sind als die der Verbrauchsmittel, ist der Gehalt an Oberschwingungen in der Spannung normalerweise deutlich kleiner als im Strom.
- Lässt sich das Auftreten von Strom-Oberschwingungen durch geeignete Auslegung des Netzes oft deutlich reduzieren, so wird dies stets mit einer zunehmenden Verzerrung der Spannung erkauft und umgekehrt, wie später besonders deutlich im Abschnitt 5.5 gezeigt werden wird.

Entsprechend wichtig ist es zum Verständnis der Zusammenhänge und Auswirkungen und zur Auswahl der passenden Gegenmaßnahmen – ebenso wie zur Beurteilung, ob Maßnahmen überhaupt erforderlich und angemessen sind – nachfolgend das Zusammenspiel von Spannungs- und Strom-Harmonischen detailliert darzustellen.

3 Wann, wie und wo Oberschwingungen entstehen

Im Kraftwerk also schon mal nicht. Im PV-Wechselrichter auch nicht, wenn alles gut geht. Oberschwingungen gehen von bestimmten Lasten aus. Solche Lasten gab es vor der Einführung der Elektronik kaum – ausgenommen Entladungslampen, aber bei diesen wurden die Auswirkungen der Unlinearität durch die ohnehin erforderliche Reihenschaltung mit einer großen Induktivität weitgehend unterdrückt. Außerdem wurden die Oberschwingungen, so sie denn auftraten, nicht als Störungen wahrgenommen, da es die hierdurch gestörten Anlagen, vorwiegend Datennetze, auch noch nicht gab.

3.1 Gleichrichterschaltungen mit Glättungskondensatoren

Elektronik muss in nahezu allen Fällen mit Gleichstrom versorgt werden, und zwar lückenlos. Gleichrichten durch einfaches Umpolen einer Halbschwingung der Sinusspannung mittels eines Brückengleichrichters genügt zum Betrieb eines Gleichstrommotors, aber kaum jemals zur Versorgung eines elektronischen Schaltkreises.

Der Nulldurchgang der Wechselspannung und der ihn umgebende Bereich zu niedriger Augenblickswerte werden daher mit einem Kondensator gepuffert (Bild ❹), der seinerseits nur während einer relativ kurzen Zeit um den Spannungs-Scheitelwert herum (Stromflusswinkel) wieder geladen wird. Nur in diesem kleinen Zeitbereich fließt noch Strom aus dem Netz, dafür dann aber umso heftiger (Bild ❺). Die dabei auf der Wechselstromseite des Gleichrichters entstehenden Ströme haben mit einer Sinusform nicht mehr viel gemein, bestehen also neben ihrer Grundschwingung aus einer theoretisch unendlichen Vielzahl von Oberschwingungen ganzzahliger Vielfacher von (in diesem Fall) 50 Hz mit beträchtlichen Amplituden.

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

Das dargestellte Beispiel entspricht dem Verhalten eines elektronischen Vorschaltgeräts (EVG) der ersten Stunde, hier für die am häufigsten eingesetzte T8-Leuchtstofflampe mit einer Nennleistung von 58 W. Zwar arbeiten heutige EVG schon lange nicht mehr nach diesem Prinzip, nicht einmal mehr im Bestand, doch in anderen Geräten, wie etwa Kompakt-Leuchtstofflampen (KLL) im Bereich bis 25 W sowie in vielen Schaltnetzteilen von Fernsehgeräten, PCs und Monitoren, ist dies noch Stand der Technik.

Man muss die 58-W-Lampe z. B. nur durch 3 oder 4 Lampen zu je 18 W ersetzen und mit einzelnen EVG betreiben, um die Vorgaben für größere Lampen zu umgehen – und schon ist normativ wieder alles im Lot. Diese Lösung kann billiger sein als der Einsatz eines Mehrfach-EVG, das dann die oberhalb von 25 W Nennleistung anzuwendenden, relativ strengen Grenzwerte erfüllen muss – nicht preiswerter oder kostengünstiger, aber billiger.

Dennoch wollen wir beim EVG alten Typs als Beispiellast bleiben, da hier ein direkter Vergleich mit der konventionellen Technik möglich ist, denn die selbe Leuchtstofflampe kann auch mit einem konventionellen induktiven Vorschaltgerät (KVG) bzw. einem verbesserten, Verlust geminderten Vorschaltgerät (VVG) betrieben werden.

3.2 Phasen-Anschnittdimmer

Es müssen aber nicht immer Gleichrichter, Schaltnetzteile oder Umrichter in irgendeiner Form sein. Nehmen wir beispielsweise die weit verbreitete Methode des Phasen-Anschnitts zur Helligkeits-Einstellung von Glühlampen. Glühlampen stellen für sich allein rein ohmsche und somit lineare Lasten dar und lassen bei symmetrischer Aufteilung auf die Außenleiter den Neutralleiter stromlos. Mittels Dimmer gedrosselt, ergeben sich aber ganz andere Verhältnisse. Nun ist die Last im ersten Teil jeder Halbschwingung abgeschaltet, ihre Impedanz also praktisch unendlich, und im zweiten Teil ist die Impedanz gleich dem Widerstand der ohmschen Last. So wird die Sinuskurve des Stroms zerschnitten, und es liegt eine Oberschwingungslast vor. Die Grenze zwischen den beiden Teilen (Zeitabschnitten) lässt sich, dem Prinzip des Dimmers entsprechend, verschieben. Für die Phasen-Abschnittdimmer, die zur Zeit im Zuge des Auslaufs von Glühlampen und deren Ersatz durch verschiedene elektronisch angesteuerte Leuchtmittel den Anschnittdimmer ersetzen, gilt spiegelverkehrt genau das gleiche. Die folgenden Betrachtungen gelten also entsprechend. Mehr hierzu im Abschnitt 5.2. Davon abgesehen verliert die Sache endgültig ihre Übersichtlichkeit, wenn die zu dimmende Last selbst eine verzerrende, elektronische ist [2].

3.3 Transformatoren

Elektronik mag neu sein; Oberschwingungen sind es keineswegs. Vielmehr fehlten, wie schon ausgeführt, die Betriebsmittel, die sich davon gestört fühlten.

So haben z. B. Transformatoren schon immer Oberschwingungsströme verursacht, da die Magnetisierungskennlinien der verwendeten ferromagnetischen Werkstoffe alles andere als linear sind (sonst gäbe es den Begriff überhaupt nicht; die „Magnetisierungskennlinie“ wäre gar kein Thema). Somit werden die Magnetisierungsströme von Transformatoren gegenüber der Sinusspannung stark verzerrt. Da aber alles relativ ist und ein guter Transformator einen sehr geringen Magnetisierungsstrom (Leerlaufstrom) aufweist, fällt dieser Effekt auch heute noch kaum ins Gewicht. Nur bei Kleintransformatoren können sie beträchtlich werden (>20 % des Nennstroms), doch diese sind eben klein. Bei Ringkerntransformatoren ebenso wie im Bereich der Verteiltransformatoren liegen die Magnetisierungsströme im Bereich von nur 1 %. Diese dürfen dann getrost stark verzerrt sein; das fällt kaum auf.

3.4 Reihenschlussmotoren

Noch ein altehrwürdiger Verbraucher, der Reihenschlussmotor, lässt sich als Beispiel nennen: Wie alle Elektromotoren, so wirkt auch dieser gleichzeitig als Generator und erzeugt eine Gegenspannung, die den Strom begrenzt (was zu den bekannten, stark überhöhten Anlaufströmen von Elektromotoren führt, solange diese Gegenspannung noch fehlt – auch eine altbekannte Form von Netzrückwirkung).

Nun ist der Reihenschlussmotor aber eigentlich ein Gleichstrommotor, der bei Bedarf auch an Wechselstrom läuft. Dadurch, dass die Erregerwicklung mit dem Anker in Reihe verschaltet ist, fällt der Erregerstrom, sobald der Ankerstrom sinkt. Beide reagieren gekoppelt auf Änderungen der Last ebenso wie der speisenden Spannung. Hierdurch ergibt sich eine näherungsweise quadratische Spannungs-Strom-Kennlinie, und damit weist die Stromkurve, über eine Periode der Wechselspannung betrachtet, tendenziell eine ähnliche Verformung auf wie die Verbraucher nach Abschnitt 3.1, nur wesentlich milder. Aber auch das hat bislang nichts und niemanden wirklich gestört.

Literatur

[1] DIN EN 61000-3-2 (VDE 0838-2):2010-03: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Teil 3-2: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter).

[2] Nähere Informationen dazu: *S. Fassbinder, R. Kleger*: LED dimmen – praktischer Erfahrungsbericht. In: ET Schweizer Zeitschrift für angewandte Elektrotechnik. Geplante Veröffentlichung in Ausgabe 09- oder 10-2013. ■

Fortsetzung

Im nächsten Teil geht es um Quantifizierung (Stichwort THD) und Auswirkungen von Oberschwingungen

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

Analyse und Auswirkungen von Oberschwingungen

Teil 2: Quantifizierung (THD) und Auswirkungen

S. Fassbinder, Düsseldorf

So genannte Oberschwingungen oder auch Harmonische entstehen vorwiegend beim Betrieb elektronischer Betriebsmittel an Wechsel- und Drehstromnetzen. Sie stellen für diese Netze eine zusätzliche und neuartige Beanspruchung dar, für die sie folglich auch nicht ausgelegt waren, was schon für Überraschungen wie Korrosion z. B. am Fundamenterder oder an Wasserrohren sorgte. PC-Netzwerke blieben um mehrere Größenordnungen hinter den versprochenen „Gigabits“ zurück und stürzten ab. Manchmal wurden Neutralleiter heiß, in extremen Einzelfällen bis zum Brand, obwohl doch jede Elektrofachkraft weiß, dass sie einphasige Lasten nur zu gleichen Teilen auf die drei Außenleiter eines Drehstromnetzes verteilen muss, und schon ist der Neutralleiter stromlos. Eben das aber funktioniert heute nicht mehr unbedingt. Dieser Beitrag bietet daher Detailkenntnisse zu Ursachen, Zusammenhängen und Lösungsmöglichkeiten.

4 Quantifizierung von Oberschwingungen

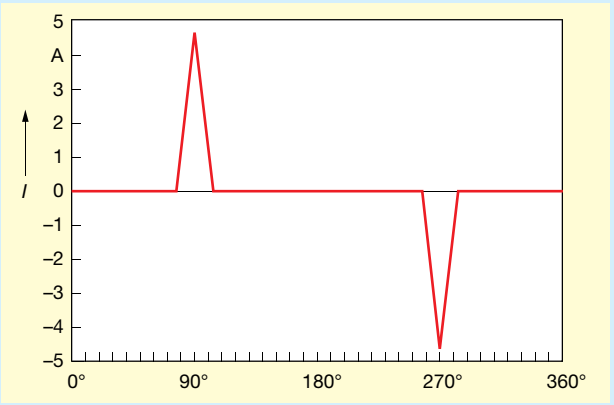
Das erste und einfachste Maß, um die Gesamtheit der Oberschwingungen in einem Stromkreis bzw. an einer Stelle des Netzes zu erfassen, ist der Gesamt-Verzerrungsgehalt THD (total harmonic distortion). Zu seiner Berechnung geht man ebenso vor wie beim Echt-Effektivwert der Überlagerung verschiedener Frequenzen, indem man die einzelnen Werte quadriert, die Quadrate addiert und aus der Summe wieder die Wurzel zieht; nur lässt man dabei die Grundschwingung aus.
In Tafel ❸ wurde der Vorgang beispielhaft für den Strom aus Bild ❻ durchgeführt.

4.1 Erste Falle: THD ist nicht gleich THD

Zumeist wird der THD nicht in Volt bzw. Ampere, sondern als relative Größe in Prozent angegeben. Unglücklicherweise gibt es hierzu zwei verschiedene Definitionen:
1. Nicht sonderlich sinnfällig, leider aber allgemein gebräuchlich ist die Auffassung als THDf (f: engl. fundamental = Grundschwingung) als Verhältnis der quadratischen Summe der Oberschwingungen zur Grundschwingung. Das ist der gleiche Käse wie beim Käse, wenn man den Fettgehalt auf die Trockenmasse bezieht statt auf den gesamten Käse – erfunden in einer Zeit, als ein Nahrungsmittel noch als umso besser galt, je mehr Fett es enthielt, und in der Absicht, größere Zahlen und damit den Anschein höheren Fettgehalts zu erzeugen. Wer warum jemals das Bestreben hatte, den Zahlenwert des THD für ein- und denselben Oberschwingungspegel in einem gegebenen Strom/einer Spannung möglichst hoch zu setzen ist unklar. Tatsache ist, dass auf diese Art in extremen Fällen, so auch in dem hier dargestellten Beispiel, der Oberschwingungsgehalt leicht Werte über 100 % erreichen kann: Wenn man den gesamten Oberschwingungsstrom von 0,886 A als ‚Anteil‘ an der Grundschwingung von 0,463 A ausdrückt, so ergibt sich hier ein Gehalt von 191 %.
2. Weniger gebräuchlich ist die Auffassung als THDr (engl. RMS – root mean square = „Wurzel aus dem Mittel der Quadrate“) als Verhältnis der Gesamtheit aller Oberschwingungen (ohne die Grundschwingung) zum gesamten Effektivstrom (einschließlich Grundschwingung). Der THDr wird in der Elektronik und insbesondere in der Elektroakustik auch Klirrfaktor genannt. Nur hiermit lässt sich mit Fug und Recht von einem ‚Gehalt von etwas an etwas anderem‘ sprechen.
Der im selben Beispiel nach Tafel ❸ errechnete Wert beträgt so ‚nur‘ noch 88 %. Die Diskrepanz ist also bei großen Werten beträchtlich! In Tafel ❶ ist er praktisch nicht vorhanden und in Tafel ❷ noch nicht bedeutend (siehe Teil 1). Wenn aber der Anteil an etwas Ganzem größer sein kann als das Ganze, dann könnte auch z. B. ein besonders scharfer Schnaps 191 % Alkohol enthalten. Da das nicht geht, sind im Folgenden alle THD-Werte, wenn nicht anders angegeben, als THDr zu verstehen.
Auf Mittelwerte, Effektivwerte, Echt-Effektivwerte und deren Unterschiede wird später in den Abschnitten 5.1 und 5.2 noch genauer eingegangen.

Autor
Dipl.-Ing. *Stefan Fassbinder* ist Berater für elektrotechnische Anlagen beim Deutschen Kupferinstitut (DKI), Düsseldorf.

❻ Dreieckiger Stromverlauf mit einem Tastverhältnis (Stromflusswinkel) von 1/7 und einem Effektivwert von 1 A: Der Scheitelwert liegt dann schon bei 4,6 A!
Quelle: S. *Fassbinder*/ep



Tafel ❸ Errechnung des Gesamt-Effektivwerts und des THD des Stromverlaufs aus Bild ❻

Errechnete Werte		Quadratwerte			Fourier-Koeffizienten (Scheitelwerte)
Echt-Effektivwert: I_{eff} = 0,9948 A **Betrags-Mittelwert: i_{AV} = 0,3273 A**			gesamt	nur für THD	
1. Grundschwingung:	I_1 = 0,4610 A	I_1^2 =	0,2125 A²	0,0000 A²	0,6519 A
3. Oberschwingung:	I_3 = – 0,4457 A	I_{3^2} =	0,1986 A²	0,1986 A²	– 0,6303 A
5. Oberschwingung:	I_5 = 0,4163 A	I_5^2 =	0,1733 A²	0,1733 A²	0,5888 A
7. Oberschwingung:	I_7 = – 0,3752 A	I_7^2 =	0,1408 A²	0,1408 A²	– 0,5306 A
9. Oberschwingung:	I_9 = 0,3255 A	I_9^2 =	0,1059 A²	0,1059 A²	0,4603 A
11. Oberschwingung:	I_{11} = – 0,2707 A	I_{11}^2 =	0,0733 A²	0,0733 A²	– 0,3829 A
13. Oberschwingung:	I_{13} = 0,2149 A	I_{13}^2 =	0,0462 A²	0,0462 A²	0,3039 A
15. Oberschwingung:	I_{15} = – 0,1614 A	I_{15}^2 =	0,0260 A²	0,0260 A²	– 0,2282 A
17. Oberschwingung:	I_{17} = 0,1134 A	I_{17}^2 =	0,0129 A²	0,0129 A²	0,1603 A
Summe der Quadrate:		$\sum I_n^2$ =	0,9896 A²	0,7771 A²	
Wurzel hieraus:			0,9948 A	0,8815 A	
THDr (r: root mean square):		0,881 A/0,994 A = 88,6 %			
THDf (F: fundamental):		0,881 A/0,460 A = 191,2 %			

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

4.2 Zweite Falle: THD ist nicht alles

Wie schon ausgeführt, ist der THD eine ganz praktische Größe für eine erste, grobe Beurteilung der Quantität der harmonischen ‚Netzverschmutzung'. Dies sollte darauf hinweisen, dass eine qualitative Betrachtung ebenfalls erforderlich, in dieser Größe aber nicht enthalten ist. Besonders fällt dies in nachfolgendem Beispiel (Bilder ❼ und ❽) auf:

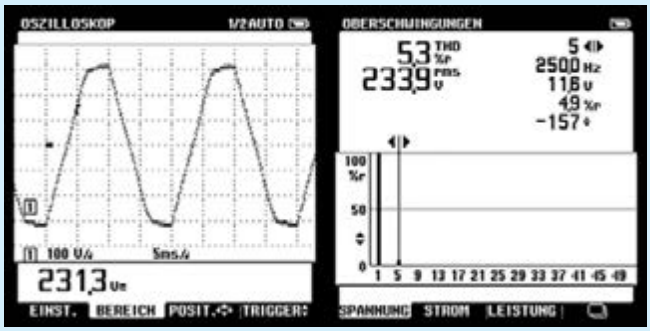
An der Spannung im Endstromkreis erkennt man zunächst einmal, dass sich diese, anders als die der Fernseh-Zuschauer, auch während äußerst brisanter öffentlicher Ereignisse in völlig normalem Rahmen hält – was den Effektivwert angeht (Bild ❼). Die Kurvenform weist jedoch eine bis dahin noch nie beobachtete ‚Verbeulung' von über 5 % THD auf. Der „Tatort" brachte es zu jener Zeit auf etwa 4,7 %. Deutlich sieht man die Verflachung um den Scheitelwert der Spannungskurve herum, wenn die vielen Glättungskondensatoren der Schaltnetzteile in den vielen Fernsehgeräten nachgeladen werden. Bei genauer Betrachtung lässt sich sogar erkennen, dass die Kuppe nicht waagerecht, sondern schräg abgeschnitten ist, da die Glättungskondensatoren in diesem Zeitbereich gerade nachgeladen werden. Die Analyse im zugehörigen Balkendiagramm zeigt, dass der größte Teil dieser Verzerrung aus der fünften Harmonischen besteht. Mit 11,6 V bei 250 Hz trägt sie 4,9 % der insgesamt 5,3 % in der Netzspannung enthaltenen ‚Fremdfrequenzen' bei. Die anderen Oberschwingungen sind mit nur unbedeutenden Anteilen beteiligt, die so gering sind, dass sie im Balkendiagramm (zu Deutsch „Benchmarks") gar nicht angezeigt werden. Das ist typisch für aus Einphasenlasten wie Schaltnetzteilen stammende Spannungs-Verzerrungen, wenn die einphasigen Endstromkreise einem Drehstromsystem entstammen und die Einphasenlasten halbwegs gleichmäßig auf die drei Außenleiter verteilt sind – obwohl im Strom selbstverständlich die dritte Harmonische dominiert. Auf die Zusammenhänge wird noch einzugehen sein.

Die Überraschung kommt dann aber, wenn man eine entsprechende Aufzeichnung der Wechselspannung zwischen zwei Außenleitern vornimmt (Bild ❽): Obwohl die Analyse hier fast das gleiche Bild abgibt, sprich von 4,7 % THD nicht weniger als 4,5 % (18 V von 400 V) aus der fünften Harmonischen stammen und der Rest entsprechend wieder in der Bedeutungslosigkeit versinkt, zeigt der resultierende Gesamt-Verlauf genau das gegenteilige Ergebnis: Die Kurve ist überspitzt statt verflacht!

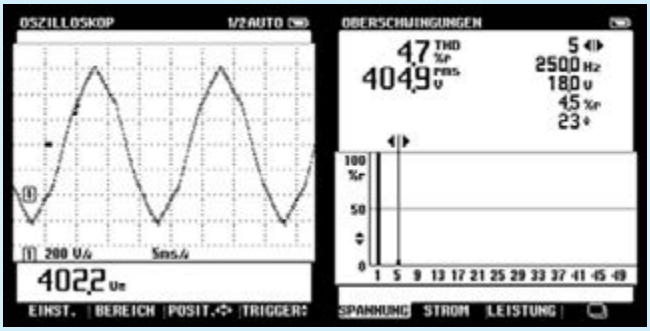
Was ist denn nun passiert?

Ganz einfach: Wir haben die Rechnung ohne den Phasenwinkel gemacht. In Bild ❾ bzw. Bild ❿ wurde dies rechnerisch am vereinfachten Modell nachvollzogen und eine Kurve ausschließlich aus ihrer Grundschwingung und 5 % Anteil der fünften Oberschwingung zusammengesetzt. Sieht man sich die Balkendiagramme in Bild ❼ und Bild ❽ aus der Nähe an, so entdeckt man, dass dort zu der jeweils angewählten Oberschwingung nicht nur der absolute und der relative Betrag, sondern auch der Phasenwinkel angegeben ist. Dieser liegt im einen Fall bei –157° und im anderen bei 23°. Damit sind die beiden fünften Harmonischen gegeneinander – gemessen an der jeweiligen Grundschwingung – um 180° versetzt. Sie haben also entgegengesetzte Phasenlage gegenüber der Grundschwingung: Im einen Fall trifft der positive Scheitel der fünften auf den negativen Scheitel der Grundschwingung, im anderen Fall addieren sich die Scheitelwerte. Dies erklärt die quantitativ zwar gleiche (die gemessene Netzspannung entspricht in beiden Fällen fast genau dem jeweiligen Nennwert), qualitativ aber gegensätzliche Auswirkung der fünften Harmonischen auf die Summenkurve. In den Prinzipdarstellungen in Bild ❾ und Bild ❿ betragen die Phasenwinkel 0° bzw. 180°. Entsprechend entfällt die Abschrägung der Kuppe.

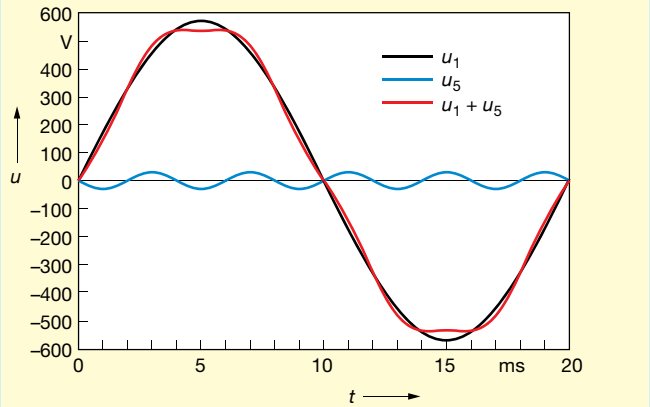
All diese Unterschiede gibt der reine THD-Wert nicht wieder. Sie können aber nichtsdestoweniger bei der Behandlung von Oberschwingungen von Bedeutung sein, etwa bei der Frage, ob diese sich bei Überlagerungen addieren oder gegenseitig auslöschen, was auch vorkommen kann.



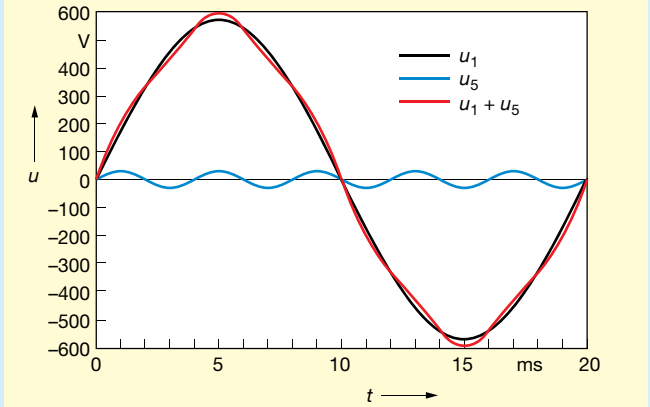
❼ **Netzspannung in einem Wohngebiet Außenleiter gegen Neutralleiter während des Endspiels um die Fußball-Weltmeisterschaft 2002**



❽ **Netzspannung in einem Wohngebiet zwischen zweien der drei Außenleiter während des Endspiels um die Fußball-Weltmeisterschaft 2002**



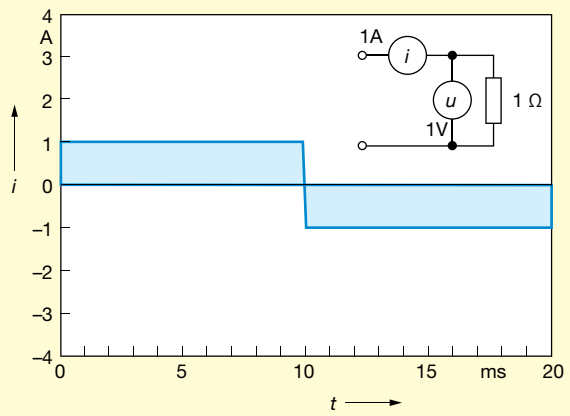
❾ **Vereinfachte Modellrechnung zu Bild ❼**



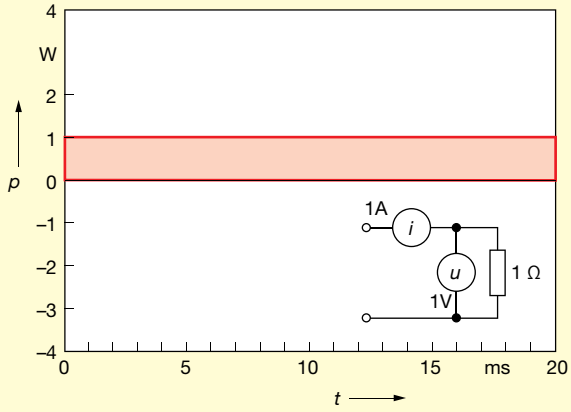
❿ **Vereinfachte Modellrechnung zu Bild ❽**

Quellen: S. *Fassbinder*/ep

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)



⓫ **Hier fließen in jeder Sekunde an jeder Stelle des Leiters 6,24 x10¹⁸ Elektronen vorbei**



⓬ **Dabei entstehen in dem Widerstand in jeder Periode 20 mJ Wärme**

Quellen: S. Fassbinder/ep

5 Auswirkungen

Ob die Oberschwingungen überhaupt irgendwelche schädlichen Auswirkungen haben, hängt vom Einzelfall ab. In vielen Fällen merkt man schlichtweg überhaupt nichts davon. Doch Vorsicht:

- Selbst wenn normative Grenzwerte überschritten werden, heißt dies noch lange nicht, dass es zu Störungen oder Schäden kommen muss.
- Umgekehrt ist das Einhalten der Grenzwerte noch lange keine Garantie für einen ungestörten Betrieb. Normen können nur Mindestforderungen für die einfachsten und häufigsten Anwendungsfälle sein. Komplexe Anlagen mit empfindlichen Geräten mögen sehr viel mehr erfordern.

Das Gesetz zur elektromagnetischen Verträglichkeit von Betriebsmitteln (EMVG) [3] verlangt, dass ein elektrisches – insbesondere elektronisches – Betriebsmittel in seiner bestimmungsgemäßen elektromagnetischen Umgebung zufrieden stellend arbeiten muss, ohne selbst in unangemessenem Umfang zu stören. Leider gibt das Gesetz nicht an, was „angemessen“ ist und was nicht, wo also die Störschwelle liegt, die ein Gerät nicht überschreiten darf und die ein anderes ertragen können muss. Das EMVG enthält überhaupt keine Grenzwerte, sondern legt lediglich fest, wer hierüber zu entscheiden hat und wie beim Auftreten von Störungen juristisch zu verfahren ist. Die Einzelheiten muss eine „benannte Stelle“ regeln.

Klassiker neu aufgelegt!

Liefert das notwendige rechtliche und technische Know-How für das Prüfen elektrischer Geräte!

- Rechtsgrundlagen der Prüfung
- Prüfaufgaben, Art der Prüfung, Prüfzeitpunkt
- Vorbereitung und Durchführung der Prüfung
- Arbeitschutz und Prüfgeräte
- Dokumentation der Prüfung
- Online verfügbar: Musterdokumente, sämtliche TRBS u. a.

10 % Preisvorteil für ep-Abonnenten

Prüfung ortsfester und ortsveränderlicher Geräte
8., stark bearb. Aufl. 2014, 39,80 €,
Bestell-Nr. 3-341-016145-0,
Autor: K. Bödeker, M. Lochthofen

Jetzt bestellen!

www.elektropraktiker.de/shop
oder Bestellschein hinten im Heft

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

ep shop

Am Ende steht wieder die Elektrofachkraft in der Verantwortung, und da ist Vorbeugung wieder in den meisten Fällen weitaus billiger als Störungen suchen und beheben. Es gibt nämlich in unseren Niederspannungs-Verteilnetzen nicht weniger als **12 mögliche Störungen und Schäden**, die sich auf Oberschwingungen zurückführen lassen:

a) 7, die überall auftreten können;
b) weitere 4, die nur in Netzen und Anlagen nach dem TN-C- und TN-C-S-System auftreten;
c) eine weitere, die bis in das Mittelspannungsnetz hinauf reicht.

Von diesen zwölf Punkten soll nachfolgend die Rede sein. Auf die entsprechenden Abhilfemöglichkeiten und normativen Vorgaben wird danach in den Abschnitten 6 und 7 näher eingegangen.

5.1 Höhere Belastung der Leiter

In der Beschriftung der Leiter im Bild ❹ im ersten Teil wurde es schon gesagt: Die Erzeugung eines Gleichstroms von 180 mA aus dem Stromnetz kann dieses Netz mit einem Wechselstrom von 615 mA belasten. Je nach der inneren Impedanz dieses Netzes kann die Diskrepanz auch deutlich kleiner oder sogar noch größer werden. Wie kann das sein?

Ein Quotient bis etwa $\sqrt{2}$ des Eingangs-Wechselstroms zum vom Kondensator abgehenden, vorgeglätteten Gleichstrom findet seine ‚natürliche' Erklärung darin, dass der Kondensator mehr oder weniger mit dem Scheitelwert der Wechselspannung, also annähernd 325 V, aufgeladen wird und entsprechend die gleiche Leistung bei geringerem Gleichstrom bereit stellt als an der Netzspannung (230 V ~) abgefordert wird.

Und der Rest? Verluste im Gleichrichter? Nein, die sind gering. Der Durchgangs-Spannungsfall beträgt etwa 1,6 V insgesamt; macht eine Verlustleistung in der Größenordnung von 0,7 % der Durchgangsleistung. Die Verluste im Elektrolyt-Kondensator sind praktisch gleich null – oder sollten es doch sein, sonst wäre der Elektrolyt schon bald verdampft. Elkos mit passiver oder gar aktiver Kühlung sind bis dato unbekannt – obwohl es vielleicht eine Idee wäre, hieraus ein Leistungsmerkmal für eine höhere Leistungsfähigkeit zu machen und den Nachteil als Vorteil zu vermarkten wie vormals den Lüfterlärm beim PC [4].

Also Blindleistung? In der Tat, genau das ist es! Blindleistung tritt immer dann auf, wenn Spannung und Strom nicht proportional zueinander verlaufen. In der Regel erfolgt dabei eine zeitweilige Umkehr des Energieflusses: Während zweier Abschnitte einer jeden Periode nimmt der Blindleistungs-Verbraucher Energie aus dem Netz auf; während zweier weiterer verhält er sich wie einst – laut Werbe-Aussagen – der berühmte Schokoriegel und bringt verbrauchte Energie sofort zurück. Eine ziemlich einfach zu bewerkstelligende Verschiebung des Stromscheitels dorthin, wo auch die Spannung ihren Scheitel hat, stellt die Proportionalität zwischen beiden wieder her. Aber das muss nicht so sein! Modernen Blindleistungs-Verbrauchern sind noch ganz andere Arten der Blindleistung eingefallen, die keinesfalls mit einer zeitweiligen Rückspeisung verbunden sein müssen und sogar bei Gleichspannungen und Gleichströmen auftreten, wenn diese nicht ‚reinrassig', sondern wellig sind: Stellen wir uns eine etwas ‚sprunghafte' Gleichspannung vor, die von einer Rechteck-Wechselspannung überlagert ist und somit über die erste Hälfte einer Periode 1 V und über die zweite Hälfte 2 V beträgt. Das ist noch praktisch vorstellbar. Nun stellen wir uns einen nicht linearen Verbraucher vor, der

- bei einer Spannung von 1 V einen Strom von 2 A aufnimmt und
- bei einer Spannung von 2 V einen Strom von 1 A aufnimmt.

Ein solcher müsste allerdings extra für diesen Versuch aus elektronischen Bauteilen aufgebaut werden, also belassen wir es beim Gedanken-Experiment. Zu denken ist an eine reine Wirklast, die also die elektrische Energie vollständig in Wärme umsetzt. Es würde sich z. B. eine elektronische Stromsenke anbieten, die, zwischen 1 A und 2 A hin und her springend, von der anliegenden Spannung entsprechend ‚invers' angesteuert wird, somit eine ohmsche Last darstellend, deren Wert jedoch zwischen 2 Ω und 0,5 Ω alterniert. Ihre Leistungsaufnahme wäre logischerweise

- im ersten Abschnitt P = 1 V x 2 A = 2 W und
- im zweiten Abschnitt P = 2 V x 1 A = 2 W.

Die übertragene Leistung betrüge also konstant 2 W. Der arithmetische Mittelwert der Spannung liegt aber bei 1,5 V und der arithmetische Mittelwert des Stroms bei 1,5 A; macht schon eine Leistung von 2,25 W. Oder doch eher 2,25 VA? Denn die Wirkleistung beträgt doch nur 2 W. Egal; ist dies doch ohnehin nicht die ganze Wahrheit. Die ‚wirklichen' Werte von Spannung und Strom sind die nach den Abschnitten 1.1 und 4 oder wie olgt berechneten Effektivwerte *U* bzw. *I*:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)dt} \quad \text{bzw.}$$

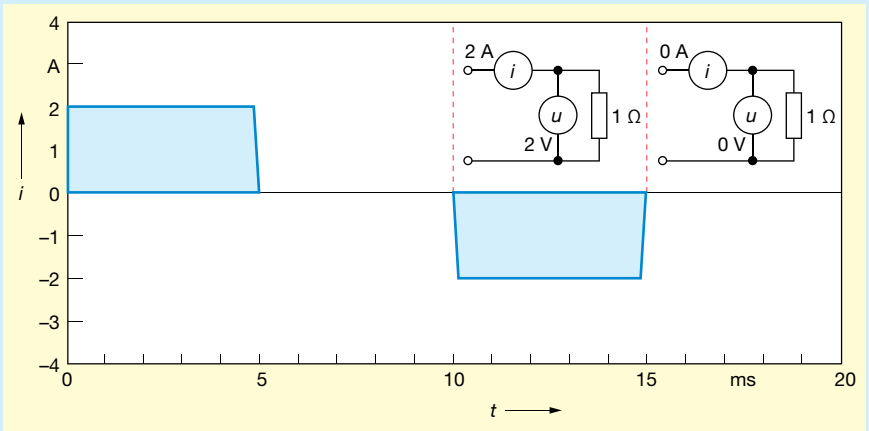
$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt}$$

mit der Periodendauer $T = \frac{1}{f}$

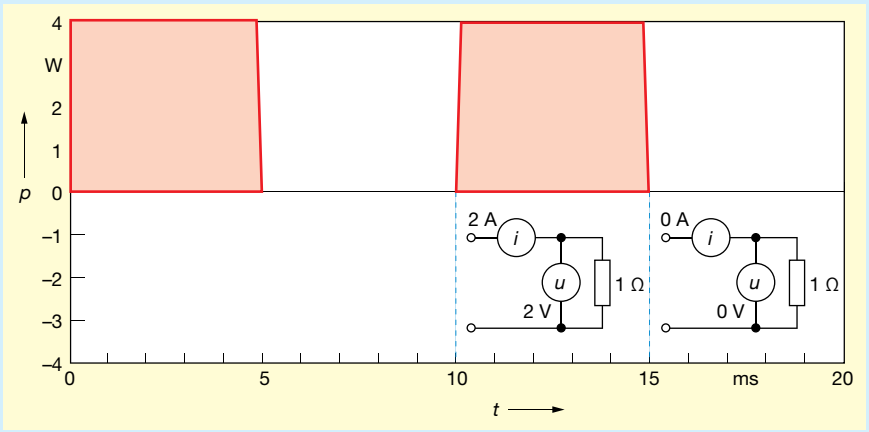
Für ein ‚Halbzeit-Rechteck' leitet sich daraus ein Effektivwert von

$$U = \sqrt{\frac{1}{2}}\ \hat{u} \quad \text{bzw.} \quad I = \sqrt{\frac{1}{2}}\ \hat{i}$$

her, entsprechend den Werten von



❸ Auch hier fließen in jeder Sekunde an jeder Stelle des Leiters 6,24 x 10^{18} Elektronen vorbei



Quellen: S. Fassbinder/ep

❹ Hier aber entstehen in demselben Widerstand in jeder Periode 40 mJ Wärme

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

Fotos: S. Fassbinder

◀ ⓯ **Ein „Effektivwert-Messgerät“ (grau) und ein „Echt-Effektivwert-Messgerät“ (rot) messen – unter Aufsicht eines hochwertigen Netzanalysators (gelb) – den Strom einer Glühlampe**

⓰ **Ein „Effektivwert-Messgerät“ (grau) und ein „Echt-Effektivwert-Messgerät“ (rot) messen – unter Aufsicht eines hochwertigen Netzanalysators (gelb) – den Strom einer elektronischen Kompakt-Sparlampe**

- im ersten Abschnitt $U_1 = \frac{1\ \text{V}}{\sqrt{2}}$ und $I_1 = \frac{2\ \text{A}}{\sqrt{2}}$,
- im zweiten Abschnitt $U_2 = \frac{2\ \text{V}}{\sqrt{2}}$ und $I_2 = \frac{1\ \text{A}}{\sqrt{2}}$.

Wie gehabt, ergeben sich die Gesamt-Effektivwerte der beiden Kurven jeweils zu

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} = \sqrt{2,5\ \text{V}^2} \approx 1,581\ \text{V} \quad \text{bzw.}$$

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2} = \sqrt{2,5\ \text{A}^2} \approx 1,581\ \text{A}.$$

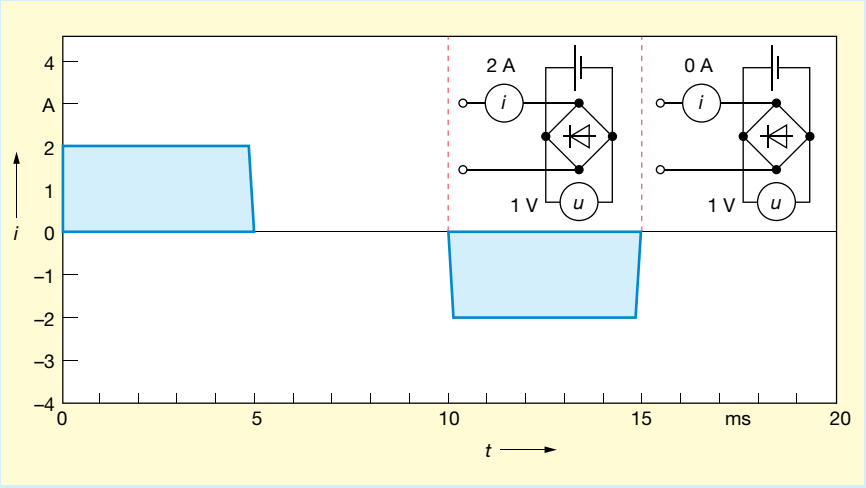
Um die oben mühelos ermittelte Wirkleistung von 2 W an unseren experimentellen elektronischen Verbraucher zu bringen, muss das Netz also eine Scheinleistung von

$$S = \sqrt{2,5}\ \text{V} \times \sqrt{2,5}\ \text{A} = 2,5\ \text{VA}$$

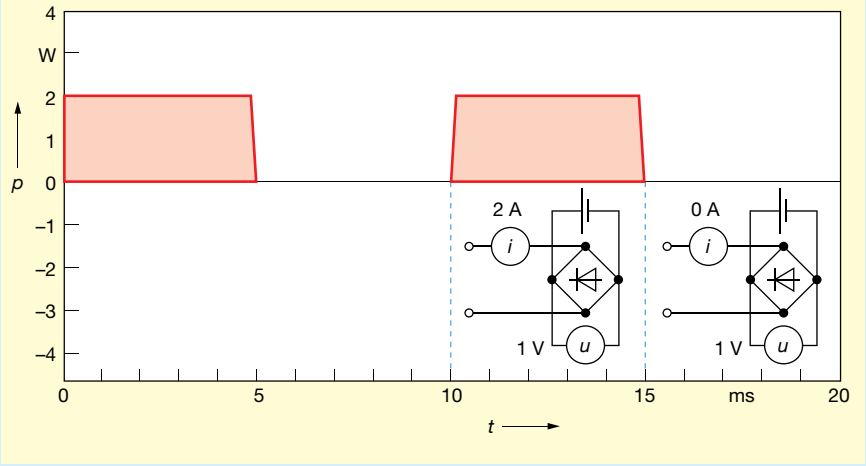
übertragen. Hierzu folgt im nächsten Abschnitt noch ein detaillierteres, bebildertes Beispiel, das diesem jedoch sehr ähnelt, denn diese beiden Punkte haben erstaunlich viel miteinander zu tun. Hier tritt die so genannte Verzerrungs-Blindleistung D noch hinzu (enthalten im Gesamt-Leistungsfaktor λ, der auf Messgeräten oft auch als *PF* – power factor – bezeichnet wird). Im Gegensatz hierzu berücksichtigt die ‚traditionelle‘ Verschiebungs-Blindleistung *Q* (Leistungsfaktor cos φ, der auf Messgeräten auch oft als *DPF* – Displacement Power Factor – bezeichnet wird) nur den zeitlichen Versatz zwischen der Spannungs-Grundschwingung und der Strom-Grundschwingung. Für die Verzerrungs-Blindleistung findet man auch das Formelzeichen Q_v und für die Grundschwingungs-Blindleistung dann entsprechend Q_1. Es bleibt festzuhalten, dass hier allein durch die nicht konstante Impedanz einer ansonsten ohmschen Last eine Blindleistung in Höhe von

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$Q = \sqrt{(2,5\ \text{VA})^2 - (2\ \text{W})^2} = 1,5\ \text{var}$$



⓱ Der Strom aus Bild ⓲ lädt nun über einen Brückengleichrichter einen Akkumulator?



Quellen: S. Fassbinder/ep

⓲ …und auf einmal ist die Wirkung die gleiche wie in Bild ⓬, ungleich derer aus Bild ⓮!

entsteht und der Leistungsfaktor sich entsprechend von 1 auf

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{2\ \text{W}}{2,5\ \text{VA}} = 0,8$$

vermindert. Die Einzelheiten geben jedoch schon wieder ein Thema für sich ab. Eine Analyse würde zeigen, dass hierin außer der neuzeitlichen Verzerrungs-Blindleistung auch (kapazitive) traditionelle Verschiebungs-Blindleistung enthalten ist, da die Spannung innerhalb jeder Periode zuerst kleinere und dann größere, der Strom aber zunächst größere und dann kleinere Werte annimmt. Es trifft nicht jeweils viel Spannung auf viel Strom, was ‚quadratviel' Leistung übertragen würde, und diese verpasste Chance nennt sich Blindleistung.

5.2 Abweichende Anzeigewerte verschiedener Messmittel

Für die Physiker – und insbesondere für die Chemiker, wie gleich zu zeigen sein wird – ist an dieser Stelle das Leben vergleichsweise einfach: Wenn an einer Stelle des Drahtes in jeder Sekunde 6,242 x 10^{18} Elektronen vorbei fließen, so stellt dies für beide eine elektrische Stromstärke von 1 A dar. Das ist nicht weiter verwunderlich, denn es handelt sich hier um den Kehrwert der Elementarladung e = 1,602 x 10^{-19} C eines Elektrons. Machen wir also die Probe:

$$1,6 \times 10^{-19}\ \text{As} \times \frac{6,24 \times 10^{\cdots}}{\text{s}} = 1\ \text{A}$$

5.2.1 Zum Wesen des Effektivwerts

Der Effektivwert ist nun derjenige, der für die Beurteilung der Erwärmung elektrischer Leiter ausschlaggebend ist. Die Erwärmung steigt mit dem Quadrat des Stroms, und dies macht es etwas schwierig, sich vorzustellen, wie die gleiche ‚Menge Strom', also die Bewegung der gleichen Anzahl Elektronen je Zeiteinheit, sich unterschiedlich auswirken kann, abhängig davon, ob sie kontinuierlich oder diskontinuierlich fließen.

Das folgende Beispiel mag dies veranschaulichen:
Ein voll ausgetasteter, also lückenloser Rechteck-Wechselstrom von 1 A ‚Scheitelwert' und einer Frequenz von 50 Hz, also etwa ein über einen elektronischen Schalter periodisch 100 Mal pro Sekunde umgepolter Gleichstrom, fließe über einen Widerstand von 1 Ω (Bild ⓫). Dann betragen natürlich der Spannungsfall am Widerstand 1 V und die in Wärme umgesetzte Leistung 1 W. Wird der Strom negativ, wird es die Spannung auch, und die Leistung bleibt somit konstant – Erwärmung als ‚positiv' gezählt (Bild ⓬). Die im Lauf einer Periode umgesetzte Energie beträgt:

$$W = 1\ \text{V} \times 1\ \text{A} \times 10\ \text{ms} + (-1\ \text{V}) \times (-1\ \text{A}) \times 10\ \text{ms}$$
$$W = 20\ \text{mWs} = 20\ \text{mJ}$$

und damit die Leistung ganz trivial

$$P = \frac{20\ \text{mWs}}{20\ \text{ms}} = 1\ \text{W}$$

Nun kann man aber auch die gleiche Ladungsmenge durch denselben Widerstand leiten, indem man über die halbe Zeit den doppelten Strom fließen lässt und die andere Hälfte der Zeit eine Pause einschiebt (Bild ⓭). Verdoppelt man den Strom, so verdoppelt sich aber auch, solange er denn fließt, der Spannungsfall an dem Widerstand. Das Ergebnis ist die vierfache Leistung über die halbe Zeit, also im Mittel die doppelte Leistung (Bild ⓮):

$$W = 2\ \text{V} \times 2\ \text{A} \times 5\ \text{ms} + (-2\ \text{V}) \times (-2\ \text{A}) \times 5\ \text{ms}$$
$$W = 40\ \text{mWs} = 40\ \text{mJ}\ ,$$

also

$$P = \frac{40\ \text{mWs}}{20\ \text{ms}} = 2\ \text{W}.$$

Man muss dem Strom also einen zweiten Wert zuordnen, der die wahre thermische Wirkung wiedergibt, und das ist der Effektivwert. Im Falle des Stromverlaufs nach Bild ⓭ beträgt er

$$I = \sqrt{2}\ \text{A} \approx 1,41\ \text{A}.$$

Dann beträgt der Spannungsfall an dem Widerstand, dessen Wert unverändert bei 1 Ω liegt, entsprechend

$$U = \sqrt{2}\ \text{V} \approx 1,41\ \text{V}$$

und die Leistung damit

$$P = \sqrt{2}\ \text{V} \times \sqrt{2}\ \text{A} = 2\ \text{W}$$

Passt! Nun müsste ein Messgerät nur noch fähig und in der Lage sein, diesen Effekt wiederzugeben. Dazu muss es die schon mehrfach erwähnte scheibchenweise Quadratur möglichst vieler Einzelwerte durchführen. Im vorliegenden Fall kommt man schon mit vier Werten je Periode zu einem absolut

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

genauen Ergebnis, aber weiß man's? Die meisten in der Praxis vorkommenden Kurvenformen folgen keiner verhältnismäßig einfachen mathematischen Beschreibbarkeit. Hohe Abtastraten sind hier eine mehrerer, jeweils nicht hinreichender, aber notwendiger Voraussetzungen.

5.2.2 ‚Unechte' Effektivwerte

Ein Dreheisen-Messwerk gibt ganz von selbst, seiner Natur entsprechend, den Effektivwert wieder, denn es beruht auf der abstoßenden Kraft zweier Magnete. Diese Kraft ist proportional zum Produkt der beiden magnetischen Feldstärken, und da beide vom selben Strom erregt werden, ist die Zeigerkraft proportional zum Quadrat des Stroms.

Ein Drehspulmesswerk verfügt über diese Eigenschaft nicht. Die Zeigerkraft ist linear vom Strom in der Spule abhängig. Man hat diese Mess-Systeme daher, da sie gegenüber den Dreheisen-Messwerken einige Vorteile aufwiesen, in den Wechselspannungs- und Wechselstrombereichen mit dem Formfaktor

$$F_F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1{,}1107$$

für die Sinusform abgeglichen. Das hat man „Effektivwert-Anzeige" genannt – zutreffend natürlich nur, wenn die zu messende Spannung bzw. der zu messende Strom auch **wirklich Sinusform** aufwies.

Mit Aufkommen der digitalen Technik, die anfangs sehr teuer war, haben die Hersteller diese Praxis kurzerhand übernommen und Geräte auf den Markt gebracht, die entweder den Betragsmittelwert ermittelten und mit dem Formfaktor multiplizierten oder den Scheitelwert ermittelten und durch den Scheitelfaktor (das Verhältnis des Scheitelwerts zum Effektivwert – bei Sinusform die allgemein bekannte $\sqrt{2}$) teilten oder...oder...oder; der Nutzer wusste es nie so genau. Für lineare Lasten funktionierte das (Bild ⓯); mit Aufkommen der elektronischen Lasten war es damit vorbei (Bild ⓰).

Messgeräte, die ‚wirklich' den Effektivwert durch Quadrieren möglichst vieler Scheibchen, Summieren und Radizieren ermittelten und damit auch für andere als Sinuskurven einsetzbar waren, waren erst recht sündhaft teuer, sollten sich aber auch verkaufen. Wie also den saftigen Aufpreis vermarkten, ohne die vorher als Vorteil angepriesene „Effektivwert-Messung" – und damit sich selbst – allzu sehr diskreditieren zu müssen? Dazu verfügen die herstellenden Firmen über Marketing-Abteilungen, die dem Effektivwert dann den „Echt-Effektivwert" zur Seite stellten, um weiterhin beide Marktsegmente bedienen zu können.

Inzwischen ist das Problem so gut wie gegessen. Auch ein digitales „Echt-Effektivwert-Messgerät" ist heute für wenig Geld zu haben. Übrig geblieben sind uns noch viele ‚(Unecht-) Effektivwert-Messgeräte' im Bestand und ein Sprachgebrauch, der zur Folge hat, dass ein „Effektivwert-Messgerät" **eben nicht** den Effektivwert anzeigt.

5.2.3 Grenzen des Effektivwerts

Den oben beschriebenen Aufwand muss man also treiben, will man Betriebsmittel hinsichtlich ihrer Erwärmung richtig bemessen. Andere Wirkungen des elektrischen Stroms hängen jedoch nicht quadratisch, sondern linear von der Stromstärke ab:

- Magnetische Wirkungen, z. B. der Betrieb eines Elektromotors.
- Chemische Wirkungen, z. B. der Ladevorgang eines Akkumulators. („Kritisch ist alleine das zeitliche Integral über die verschiedenen Ladezustände", Prof. Dr. *Dirk Uwe Sauer*, RWTH Aachen, 2013).

Stehen diese zur Diskussion, sind die beiden Ströme aus Bild ⓫ und Bild ⓭, über die gesamte Periodendauer gemittelt, äquivalent (Bilder ⓱ und ⓲). So wären beispielsweise Drehmoment und Drehzahl eines Elektromotors, mit jenen Strömen gefüttert, in beiden Fällen gleich – und somit auch die abgegebene mechanische Leistung. Die abgegebene thermische Leistung würde sich aber im zweiten Fall gegenüber dem ersten verdoppeln! Der Motor könnte also durchbrennen – sehr zur Verwunderung des Betreibers, der den Motor mechanisch nicht überfordert hat. Das gleiche gilt für die Erwärmung eines Akkumulators jedweder Bauart. Geht es aber um die Erfassung der in besagtem Akkumulator gespeicherten Ladung, so **muss** das Mittelwert-Instrument gewählt werden, sonst gibt es eine böse Überraschung, wenn man für 2 h mit 2 A lädt, aber hinterher nur eine Ladung von 2,8 Ah im Akku vorfindet. Hier ist der Ansatz bloßen Zählens vorbei fließender Elektronen der einzig richtige. Zur Bemessung der Zuleitungen und ggf. eines Transformators in dem Ladegerät muss jedoch der Effektivwert zu Grunde gelegt werden – und zwar der ‚echte'.

Literatur

[3] Siehe: www.bmwi.de/DE/Service/gesetze, did=21938.html
[4] *Stefan Fassbinder*: „Viel Lärm um nichts". Schweizer Zeitschrift für angewandte Elektrotechnik ET 8/2009, S. 76; siehe auch www.technologieforumkupfer.de/anwendungen/e-energie/strom/edv

Fortsetzung

Im nächsten Teil werden u.a. Auswirkungen auf den Neutralleiter, auf Drehfeldmotoren und Transformatoren betrachtet.

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

Analyse und Auswirkungen von Oberschwingungen

Teil 3: Auswirkungen auf Neutralleiter, Drehfeldmotoren und Trafos

S. Fassbinder, Düsseldorf

So genannte Oberschwingungen oder auch Harmonische entstehen vorwiegend beim Betrieb elektronischer Betriebsmittel an Wechsel- und Drehstromnetzen. Sie stellen für diese Netze eine zusätzliche und neuartige Beanspruchung dar, für die sie folglich auch nicht ausgelegt waren, was schon für Überraschungen wie Korrosion z. B. am Fundamenterder oder an Wasserrohren sorgte. PC-Netzwerke blieben um mehrere Größenordnungen hinter den versprochenen „Gigabits“ zurück und stürzten ab. Manchmal wurden Neutralleiter heiß, in extremen Einzelfällen bis zum Brand, obwohl doch jede Elektrofachkraft weiß, dass sie einphasige Lasten nur zu gleichen Teilen auf die drei Außenleiter eines Drehstromnetzes verteilen muss, und schon ist der Neutralleiter stromlos. Eben das aber funktioniert heute nicht mehr unbedingt. Dieser Beitrag bietet daher Detailkenntnisse zu Ursachen, Zusammenhängen und Lösungsmöglichkeiten.

5.3 Belastung des Neutralleiters

Es wurde bereits ausgeführt, dass jede einzelne Oberschwingung des Stroms eine unterschiedliche Phasenlage zur Grundschwingung der Spannung haben kann. Nun darf man bei symmetrischer Aufteilung von Einphasenlasten, also gleich große und gleichartige Last auf jedem Außenleiter, sehr wohl davon ausgehen, dass jede Oberschwingung zur betreffenden Außenleiterspannung die gleiche Phasenlage hat wie die entsprechenden Oberschwingungsströme gleicher Ordnung in den anderen beiden Außenleitern. Dennoch müssen sich die harmonischen Ströme, anders als die Grundschwingung, im Rückleiter nicht unbedingt gegenseitig aufheben. Dazu gibt es wieder eine ‚synthetische‘ (gesamtheitliche, anschauliche) und eine ‚analytische‘ Methode (durch Betrachtung der einzelnen Harmonischen), sich dieses vorzustellen.

5.3.1 ‚Analytische‘ Darlegung

In der Trigonometrie gilt für jeden beliebigen Winkel α die Beziehung:

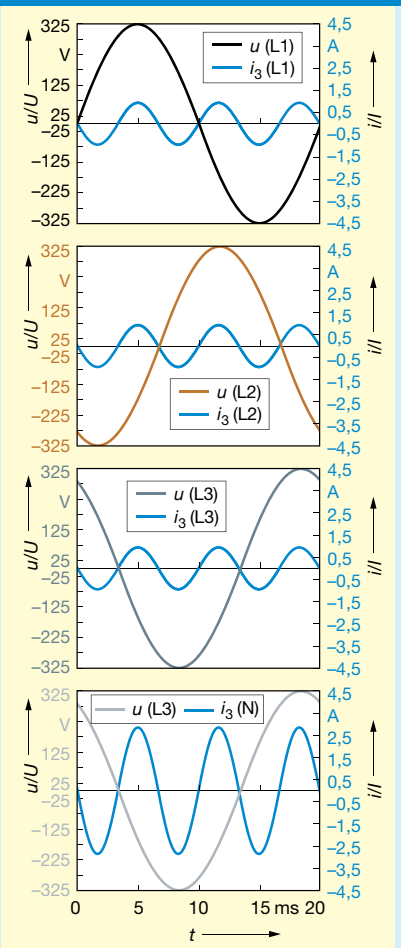
$$\sin \alpha + \sin (\alpha + 120°) + \sin (\alpha - 120°) = 0$$

Das ist die Begründung dafür, dass bei symmetrischer Aufteilung von Sinusströmen im Neutralleiter nichts fließt. Damit ist es aber ganz offensichtlich, dass dies für andere Kurvenformen nicht zwangsläufig gelten muss. Vor allem die dritte Harmonische (insbesondere des Stroms) vollführt genau eine volle Periode, wenn die Grundschwingung (insbesondere der Spannung) um ein Drittel einer Periode, also 120°, voran schreitet. 120° beträgt aber auch der Phasen-Versatz zwischen den drei Außenleiterspannungen. So ergibt es sich, dass die drei dritten Oberschwingungen in den drei Außenleitern synchron bzw. homopolar zueinander verlaufen, also keinen zeitlichen Versatz zueinander aufweisen (Bild ⓳). Die Oberschwingungsströme dritter Ordnung von gleichartigen Lasten addieren sich also voll.

5.3.2 ‚Synthetische‘ Darlegung

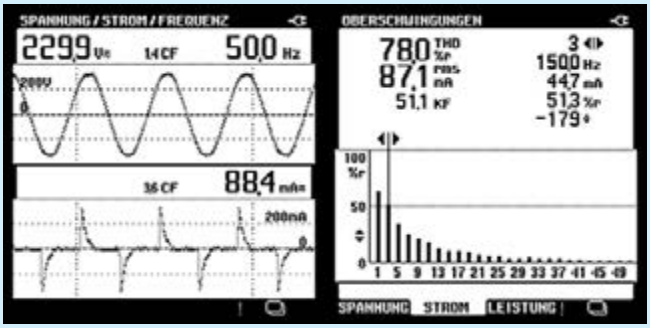
Diese Vorgänge lassen sich auch nach der vor Zeiten in der Grundschule so hoch gelobten „Ganzheitsmethode“ veranschaulichen: Die Ströme können sich im Neutralleiter nur dann gegenseitig reduzieren bis hin zur vollkommenen Auslöschung, wenn im selben Moment, in dem ein Strom in einem Außenleiter in die eine Richtung fließt, in einem der anderen Außenleiter ein entsprechender Strom in die Gegenrichtung fließt. Sind die Stromflusswinkel aber so klein, dass in jedem Außenleiter nur über ein Drittel der gesamten Zeit überhaupt irgendein Strom fließt, so können sie sich nicht zeitlich überlappen. Die Rückströme der drei Außenleiter finden sich dann in unverminderter Härte alle drei im Neutralleiter wieder.

Tatsächlich sind z. B. die Stromflusswinkel marktüblicher KLL (Bild ⓴), auch wenn diese normgemäß ausgeführt sind, kaum größer als 60°. Vor der Verabschiedung entsprechender normativer Vorgaben waren sie sogar etwas kleiner, sodass selbst der aus der Überlage-



⓳ **Addition der Ströme der dritten Oberschwingung im Neutralleiter**

Autor
Dipl.-Ing. *Stefan Fassbinder* ist Berater für elektrotechnische Anlagen beim Deutschen Kupferinstitut (DKI), Düsseldorf.



⓴ **Eine KLL 11 W - mit 78 % THD immer noch normgemäß**

㉑ **Zwei KLL je 11 W, zweiphasig betrieben, Neutralleiterstrom gemessen**

Bilder: *S. Fassbinder*/ep

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

rung dreier Außenleiterströme entstehende Neutralleiterstrom noch periodische Lücken aufwies. Statt gegenseitiger Auslöschung findet also eine Addition statt (Bild ㉑, Bild ㉒)! So konnten sich die 75 mA einer Lampe bis dahin bei dreiphasigem Betrieb dreier gleicher Lampen an drei Außenleitern theoretisch zu 130 mA im Neutralleiter auftürmen. Das entspricht dem Faktor √3, der sich durch die quadratische Addition (Abschnitt 1.1) dreier gleicher Ströme, hier der verzerrten Rückströme, als Gesamt-Effektivwert ergibt. Heute werden ‚nur noch' 125 mA erreicht (Bild ㉒). Diesen immensen Fortschritt hat die Norm gebracht (Abschnitt 7).

Also liegt hier im Prinzip die Möglichkeit vor, einen Neutralleiter, der unter Umständen nur über 50% des Querschnitts verfügt, mit 173% des Außenleiterstroms zu belasten. Anmerkung eines Zynikers in einem Seminar an dieser Stelle: „Na und? Der N ist ja nicht gesichert!" Verräterisch ist die Frequenz des Neutralleiterstroms von 150 Hz. Hieran erkennt man, dass dieser Strom aus Unlinearitäten der Lasten stammt. Betrüge die Frequenz 50 Hz, so wäre die Ursache in Unsymmetrien zu suchen.

Bemerkenswert ist der THD von 100% im Neutralleiter (Bild ㉒). Dies ist logisch, denn die Grundschwingungen haben sich gegenseitig aufgehoben, und im Neutralleiter findet das Messgerät nur noch Oberschwingungsströme vor, während als Referenz die Netzspannung dient, deren Frequenz nach wie vor 50 Hz beträgt. Hätte man auf den Strom im Neutralleiter getriggert, so hätte das Gerät eine Grundschwingung von 150 Hz ermittelt und die Verzerrung dieses Stroms auf dieser Basis beurteilt.

Weiterhin sieht man am Balkendiagramm, dass sich im Fall des symmetrischen dreiphasigen Betriebs nur die Oberschwingungen durch 3 teilbarerer Ordnung im Neutralleiter anreichern; die anderen heben sich bei Symmetrie nach wie vor auf.

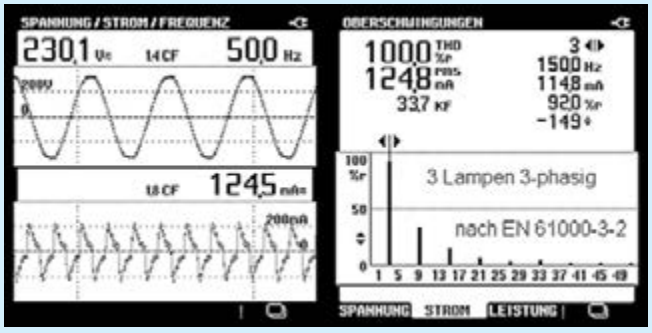
5.3.3 Konsequenzen für die Praxis

Also werden wir wohl am Oberschwingungs-Tsunami ersticken? Bei richtiger Netzform in Tateinheit mit ausreichender Auslegung gewiss nicht; bei falscher unter Umständen schon.

Es ist zu berücksichtigen, dass die KLL (im Volksmund „Energiesparlampe"), angetreten zur Ablösung der Glühlampe, gegenüber dieser tatsächlich nahezu 75 % Energie einspart. Da können die Effektivwerte der verzerrten Ströme im Verhältnis zur Wirkleistung getrost doppelt so hoch sein, also der Leistungsfaktor nur λ ≈ 0,5 betragen, was ein üblicher Wert ist; im Verhältnis zur Lichtleistung sind sie noch immer nur halb so hoch. Selbst wenn man die neu hinzutretende Belastung des Neutralleiters einrechnet, so kommt es gegenüber symmetrisch verteilten Glühlampenlasten nicht, wie manche Fachkräfte befürchten, durch die Umstellung zu einer Mehrbelastung des Netzes, sondern sogar zu einer Entlastung: In Tafel ❹ wurden für Glühlampen und vergleichbare KLL die relativen Leitungsverluste jeweils im einphasigen, zweiphasigen und dreiphasigen Betriebsfall verglichen, bezogen auf den dreiphasigen Fall der Glühlampen als Referenz.

Dennoch ist zu berücksichtigen, dass im Wohnungsbereich, für welchen die KLL in erster Linie entwickelt wurde, der Aufwand für die Beleuchtung gar nicht so hoch ist. Im Durchschnitt werden 9,2% [5], für einen ansonsten eher sparsamen Haushalt 22,7% [6] am Stromverbrauch genannt (denn beim Licht ist die Spartechnik bereits weiter vorgedrungen als in anderen Sektoren – Potential bereits großenteils erschlossen). Die Ablösung weniger größerer KLL durch viele kleine LED-Lichtpunkte hilft natürlich wieder der Nutzung von Normen-Schlupflöchern für kleine Lampen, doch die Gesamtleistung wird allemal vergleichsweise gering bleiben, da niemand ein Wohnzimmer so taghell erleuchten möchte wie ein Büro oder einen Supermarkt.

An diesen Orten allerdings, wo gut 35% der gesamten Anschlussleistung ebenso wie der Energie auf die Beleuchtung entfallen, im Büro zudem ein weiteres Drittel auf die EDV, wird ein ausreichend starkes TN-S-System umso wichtiger. Dabei muss der reduzierte N-Leiter-Querschnitt in allen Teilen des Netzes der Vergangenheit angehören, und es kann der Einsatz einer Neutralleiter-Überwachung notwendig werden, die alle Außenleiter abschaltet, ehe sich die gesamte Leitung wegen erhöhten Stroms im Neutralleiter überhitzt [7].



Bilder: S. Fassbinder/ep

㉒ Drei KLL je 11 W, dreiphasig betrieben, Neutralleiterstrom gemessen

Schutzanlagen fachgerecht errichten und betreiben

Das Standardwerk zur Schutztechnik enthält:

- Geräte zur Messwerterfassung
- Messgrößenverarbeitung
- Steuer- und Meldestromkreise
- Schutzsysteme für Motoren, Transformatoren, Leitungen, Generatoren und weitere Betriebsmittel
- Arbeitssicherheit, Unfallverhütung, Brandschutz
- Messen und Prüfen, Nachweise der Prüfungen
- Statistik in der Schutztechnik und Tendenzen

Handbuch Schutztechnik, 9., akt. Aufl. 2010, 456 S., 300 Abb., Hardcover, 58,00 €, Bestell-Nr. 3-341-01591-9, Autor: W. Doemeland

Jetzt bestellen!

www.elektropraktiker.de/shop
oder Bestellschein hinten im Heft

ep shop

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

Tafel 4 Vergleich der Strombelastungen – Grundschwingung und Oberschwingungen – beim Ersatz einer Glühlampe (40 W) durch eine äquivalente Kompakt-Sparlampe (9 W)

		Glühlampen					Kompakt-Leuchtstofflampen				
		I_{L1}	I_{L2}	I_{L3}	I_N	Gesamt	I_{L1}	I_{L2}	I_{L3}	I_N	Gesamt
Strom	einphasig	175 mA	0 mA	0 mA	175 mA	P_{CU} im Netz	70 mA	0 mA	0 mA	70 mA	P_{CU} im Netz
	zweiphasig	175 mA	175 mA	0 mA	175 mA		70 mA	70 mA	0 mA	99 mA	
	dreiphasig	175 mA	175 mA	175 mA	0 mA		70 mA	70 mA	70 mA	121 mA	
Relative Leitungs-verluste	einphasig	100 %	0 %	0 %	100 %	67 %	16 %	0 %	0 %	16 %	11 %
	zweiphasig	100 %	100 %	0 %	100 %	100 %	16 %	16 %	0 %	32 %	21 %
	dreiphasig	100 %	100 %	100%	0 %	100 %	16 %	16 %	16 %	48 %	32 %

5.4 Drehfeldmotoren: Überhitzung und Hochlaufprobleme

Wer hätte gedacht, dass ein allgemein als so robust geltendes Betriebsmittel wie ein Drehstrom-Asynchronmotor sich auf einmal als Mimose erweist, wenn die speisende Spannung von Oberschwingungen überlagert ist? Dies aber findet eine verhältnismäßig einfache Erklärung: Würde der Motor ausschließlich von der dritten Harmonischen gespeist, so wäre das so, als schlösse man alle drei Außenleiter-Anschlüsse an einen Außenleiter an (Bild 23). Ist die Wicklung im Dreieck verschaltet oder der Sternpunkt nicht angeschlossen, passiert gar nichts, nur Schweigen im Walde. Mit angeschlossenem Sternpunkt aber wäre wüstes Gebrumm das Resultat, wenig später auch Gerüche, aber kein Drehmoment. Man spricht hier von einem Nullsystem, da es phasengleich ist, also gar keinen Drehsinn besitzt. Wo kein Drehfeld, da kein Drehmoment.

Die siebte Harmonische – ein Mitsystem – möchte den Motor schon antreiben, jedoch mit der siebenfachen Nenndrehzahl (Bild 25). Das geht nur nicht, weil die stärkere Grundschwingung der Spannung ihm die Solldrehzahl aufzwingt. Also sieht es aus Sicht dieser siebten Spannungs-Harmonischen aus, als speise sie einen Motor, der mit nur knapp einem Siebtel der Synchrondrehzahl läuft, also annähernd still steht!

Die fünfte Harmonische dagegen möchte den Motor ‚nur' mit der fünffachen Synchrondrehzahl antreiben – allerdings anders herum als er gerade läuft (Bild 24). Man spricht daher von einem Gegensystem. Die fünfte Spannungs-Harmonische speist also aus ihrer ‚persönlichen' Sicht ständig auf einen rückwärts laufenden Motor! Der zugehörige Strom ist zwar größtenteils induktiver Natur und somit die Impedanz des Motors bei höheren Frequenzen entsprechend höher. Dieser Strom stellt jedoch einen permanenten – und wegen des falschen Drehsinns noch verschärften – Anlaufstrom dar.

Drehstrom-Asynchronmotoren können sich also auch ohne mechanische Überlast schon unzulässig erwärmen, wenn die Netzspannung nur wenige Prozent THD aufweist, da der THD im Strom deutlich höher liegen kann.

Energie speichern!

Auslegung, Installation und Wartung

- Spezifische Merkmale verschiedener Batterietypen und deren bevorzugten Einsatzzweck
- Auslegung, Dimensionierung und Berechnung der gesamten Batterie-Anlage
- Einsatzvarianten in stationären Stromversorgungsanlagen
- Aufstellen der Batterien, Belüftung und Ausrüstung der Batterieräume sowie das Inverkehrbringen und Entsorgen
- Hinweise zur Wartung und Diagnose bis hin zum „Wiedererwecken" geschädigter Batterien und Darstellung möglicher Schadensbilder

10 % Preisvorteil für ep-Abonnenten

Stationäre Batterie-Anlagen,
1. Aufl., 29,80 €, Bestell-Nr. 3-341-01610-7,
Autor: E. Schoop

Jetzt bestellen!

www.elektropraktiker.de/shop
oder Bestellschein hinten im Heft

ep shop

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

5.5 Wechselwirkungen zwischen Oberschwingungen und Transformatoren

Oberschwingungen haben ihre Auswirkungen auch auf Transformatoren, doch gleichzeitig nehmen die Transformatoren Einfluss auf das Oberschwingungs-Verhalten der Lasten vor und hinter dem Trafo. Das macht das Verständnis der nachstehend zwangsläufig ein wenig ‚durcheinander' beschriebenen Zusammenhänge nicht gerade einfach.

5.5.1 ‚Zusätzliche Zusatzverluste' in Transformatoren

Die Verlustleistung P_V eines Transformators wird nach Lehrbuch wie folgt aus dem konstanten Leerlaufverlust (Eisenverlust) P_{Fe}, dem Lastverlust (Kupferverlust) P_{Cu} und dem Laststrom I_2 (im Verhältnis zum Bemessungs-Laststrom I_{2N}) wie folgt erfasst:

$$P_V = P_{Fe} + \left(P_{Cu(N)} + P_{Z(N)}\right)\left(\frac{I_2}{I_{2N}}\right)^2$$

Der Leerlauf- sowie der Kupferverlust bei Bemessungsstrom werden stets vom Hersteller auf dem Leistungsschild angegeben und sind sogar klassifiziert [8], der Zusatzverlust P_Z jedoch als solcher nicht direkt. Da dieser sich, wie der Lastverlust, proportional zum Quadrat des Laststroms verhält, wird er diesem zugeschlagen und nicht separat ausgewiesen. Er rührt von Wirbelströmen in mechanischen Bauteilen, vor allem aber in den dicken Leitern der US-Wicklung her, wo durch magnetische Streufelder Kreisströme senkrecht zur eigentlichen Flussrichtung des Laststroms induziert werden.

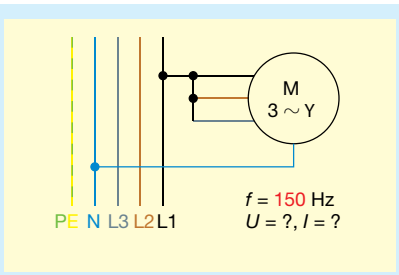
Ein Wirbelstrom wird durch eine ‚Wirbelspannung' getrieben – wenn auch der Ausdruck unüblich ist, aber vorhanden sein muss eine solche Spannung, denn wo keine Spannung, da kein Strom. Diese ‚Wirbelspannung' wird durch magnetische Streufelder induziert, und diese Streufelder stammen aus dem Teil des Magnetfeldes, das nicht im Kern, sondern zwischen OS- und US-Wicklung verläuft (Haupt-Streukanal). Seine Feldstärke ist proportional zum Laststrom.

Nun ist eine induzierte Spannung aber nicht proportional zu einer magnetischen Feldstärke oder einem magnetischen Fluss, sondern zu dessen Änderungs-Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit, mit der sich ein magnetisches Wechselfeld ändert, ist proportional zu dessen Scheitelwert und zur Frequenz des Wechselfeldes. Der Wirbelstrom steigt proportional zur ‚Wirbelspannung', und der Wirbelstromverlust errechnet sich aus Spannung mal Strom. Vollständig müsste die Formel zur Errechnung der Verlustleistung in einem Transformator also lauten:

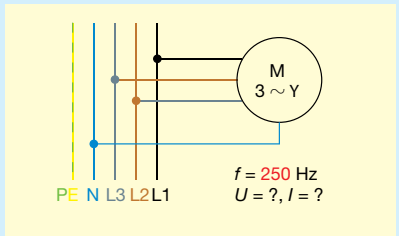
$$P_V = P_{Fe(N)}\frac{f}{f_N}\left(\frac{U_1}{U_{1N}}\right)^2 + P_{Cu(N)}\left(\frac{I_2}{I_{2N}}\right)^2 + P_{Z(N)}\left(\frac{f}{f_N} * \frac{I_2}{I_{2N}}\right)^2$$

Man ist nur bislang immer davon ausgegangen, die Betriebsfrequenz f des Netzes werde schon der Nennfrequenz f_N entsprechen. Tatsächlich gibt es in der Technik – außer vielleicht in der Raumfahrt – kaum etwas so Genaues wie die Frequenz im westeuropäischen Verbundnetz [9]. Zwar ändert sich der Eisenverlust auch näherungsweise mit dem Quadrat der Eingangsspannung U_1, doch geht man auch hier von keinen nennenswerten Schwankungen aus, nimmt also an, dass $U_1 \approx U_{1N}$ sein wird.

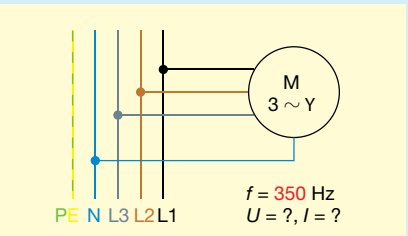
Was nun aber, wenn sich mehrere Frequenzen im Transformator tummeln? Der Bemessungswert des Stroms bezieht sich stets auf ohmsche Last und Nennfrequenz. Die Zusatz-Verluste jedoch steigen im Quadrat zum Strom und im Quadrat zur Frequenz! Der Transformator kann sich also überhitzen, obwohl der Laststrom den Bemessungswert – echt effektiv, richtig gemessen – nicht überschritten hat. Das Ausmaß dieses Einflusses lässt sich jedoch quantifizieren. Nichts leichter als das. Schließlich gibt es in der dafür relevanten



㉓ Die dritte Spannungs-Oberschwingung, ein Nullsystem, speist auf einen Drehstrom-Asynchronmotor



㉔ Die fünfte Spannungs-Oberschwingung, ein Gegensystem, speist auf einen Drehstrom-Asynchronmotor



㉕ Die siebte Spannungs-Oberschwingung, ein Mitsystem, speist auf einen Drehstrom-Asynchronmotor

Kurzschluss-Sicherheit kompetent realisieren

Kurzschlussströme wirkungsvoll ausschließen

- Bedeutung eines Kurzschlusses für Planer, Errichter und Prüfer
- Der Kurzschluss in elektrischen Anlagen und Netzen
- Kurzschluss-Ströme im Mittel- und Niederspannungsnetz
- Schutzeinrichtungen
- Kurzschlussfestigkeit von Betriebsmitteln und Anlagen
- Prüfung des Kurzschluss-Schutzes u.v.m.

10 % Preisvorteil für ep-Abonnenten

Schutz bei Kurzschluss in elektrischen Anlagen, 2., überarb. u. erw. Aufl., 29,80 €, Bestell-Nr. 3-341-01554-4, Autor: K.-H. Kny

Jetzt bestellen!

www.elektropraktiker.de/shop oder Bestellschein hinten im Heft

ep shop

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

Norm [10] zwei ‚ganz einfache' Formeln, die etwa so aussehen:

$$K = \left[1 + \frac{e}{1+e}\left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \sum_{n=2}^{n=N} n^q \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$I = \left(\sum_{n=1}^{n=N} (I_n)^2\right)^{\frac{1}{2}} = I_1 \left[\sum_{n=1}^{n=N} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

Der einzige Haken dabei ist, dass man Werte eingeben muss, die kaum jemals vorliegen. So nützt die genaueste Formel nichts. Was also tun? Weiter kommt man oftmals mit einer Extremwert-Betrachtung, indem man sich überlegt, was denn im ungünstigsten Fall eintritt. Wenn dieser Fall – nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich – noch beherrschbar ist, ist für diesen auszulegen, und man hat eine beruhigende Reserve.

Den ungünstigsten Fall stellt für den Transformator wahrscheinlich die KLL dar. Sie tut ihm normalerweise nur deshalb nicht weh, weil sie so klein und ihr Betriebsstrom entsprechend gering ist, dabei aber in der Regel auch nicht in Massen auftritt.

5.5.2 Der Transformator als Oberschwingungsfilter

Wenn aber doch? Folgendes Gedanken-Experiment kann helfen: Verteiltransformatoren gibt es mit 4% und 6% Kurzschlussspannung. Diese Größe beschreibt den inneren Spannungsfall des Trafos, und der ist größtenteils induktiv. Er wird durch das Streufeld hervorgerufen, das, vereinfacht ausgedrückt, die US-Wicklung nur zu gut 96% bzw. 94% als solche wirken lässt. Zu knapp 4% bzw. 6% ist sie als Luftdrossel tätig (eigentlich Öldrossel, aber „Luft" heißt hier nur „kein Magnetwerkstoff") – und begrenzt so den Kurzschlussstrom. Das muss so sein, um den Trafo vor Zerstörung durch magnetische Kräfte zu bewahren. Gehen wir also von 4% aus, damit auch von den höheren Frequenzen noch größtmögliche Anteile fließen und entsprechende Wirkung hinterlassen.

Der Zusatzverlust liegt in einem gewöhnlichen Verteiltrafo bei etwa 5% bis 10% des Lastverlusts. Gehen wir also von 10% aus, damit der Fall wirklich ungünstig wird, und schließen wir **1000 KLL zu je 11 W** an einen Trafo mit obigen Werten und einer Nennleistung von 15 kVA an. Sind gerade keine 1000 Lampen zur Hand, so tut es auch eine Simulation: Ein Transformator mit dieser Auslegung wird – auf die Ausgangsspannung bezogen – einen Durchgangs-Widerstand von etwa 30 mΩ (15 mΩ in der Ausgangswicklung und umgerechnete 15 mΩ in der Eingangswicklung) sowie eine Streuinduktivität von ziemlich genau 360 µH haben. Letzteres ergibt sich zwingend aus der Nennleistung und der Kurzschlussspannung. Dann kann man auch eine einzige Lampe ohne den Trafo direkt ans Netz anschließen und einen Widerstand von 30 Ω plus eine Induktivität von 360 mH dazu in Reihe schalten, und schon wird sich diese eine Lampe gerade so verhalten, als würden 1000 Stück davon an besagtem Trafo betrieben – so gemessen in Bild ㉖:

Oben ein einziges Lämpchen allein; dessen Netzrückwirkung kann vernachlässigt werden. Was dort im Frequenzspektrum der Spannung zu sehen ist (1,6% THDr, 3 V 5. Oberschwingung) war im Netz vorher schon vorhanden und hat wesentlich mehr mit den vielen, vielen anderen Lampen und Lämpchen zu tun, die daran schon brennen. Die Scheinleistung beträgt gute 20 VA, der Leistungsfaktor also nur 0,59!

Unten dann die Verhältnisse, wie sie sich mit 1000 Lampen und den genannten Trafodaten ergäben: Die Oberschwingungsströme werden durch die Streureaktanz des Trafos deutlich unterdrückt! Der THDr sinkt dadurch im Strom von 78% auf 66,3%, die Scheinleistung (die elektrische; der Lichtschein bleibt gleich) der Lampe fällt auf nur noch 15 VA, und der Leistungsfaktor steigt auf 0,73 – jedoch, wie üblich, um den Preis einer Vervierfachung des THDr in der Spannung auf 6,4%.

Fachwissen kompakt!

ep-Sonderhefte zu den Themen:

- Blitz- und Überspannungsschutz NEU!
- Kleinsteuerungen
- Sicherheitstechnik
- Rechtssicherheit für Elektrofachkräfte
- Gebäudeautomation
- Gebäudeinstallation
- Energieeffizienz
- Erneuerbare Energien

für nur 15,– €

Jetzt bestellen!

www.elektropraktiker.de/sonderhefte
oder über den Bestellschein hinten im Heft.

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

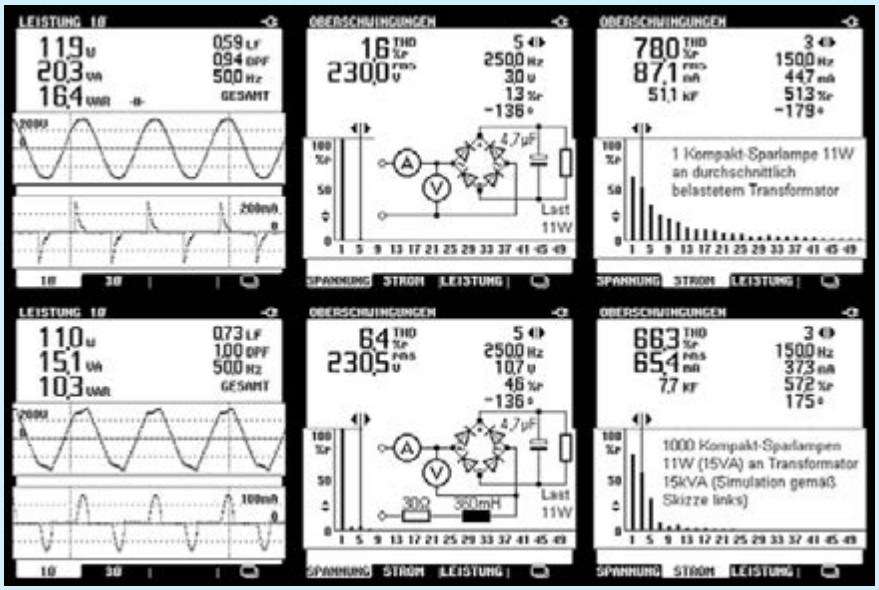


Bild: S. Fassbinder

㉖ Schaltung zur Ermittlung der Werte für Tafel 5 (unteres Bild) und Tafel 6 (oberes Bild)

Tafel ⑤ Aufrechnung der in einem Transformator bei reiner KLL-Last zusätzlich anfallenden Zusatzverluste

Oberschwingungen einer Sparlampe Osram Dulux 11 W mit Serien-Impedanz R = 29,1 Ω und XL = 113 Ω				
n	U (V)	I_L (mA)	I_N (mA)	P_Z/P_{CuN} (%)
1	230,2	48,5	0,0	5,6
3	8,3	37,1	111,3	29,5
5	10,7	20,3	0,0	24,5
7	4,3	5,3	0,0	3,3
9	1,1	3,0	9,0	1,7
11	2,3	3,8	0,0	4,2
13	1,0	1,5	0,0	0,9
15	0,6	1,5	4,5	1,2
17	1,1	1,5	0,0	1,5
19	0,5	0,9	0,0	0,7
21	0,5	1,3	3,9	1,8
23	0,6	0,8	0,0	0,8
25	0,4	0,6	0,0	0,5
27	0,6	0,8	2,4	1,1
29	0,4	0,5	0,0	0,5
31	0,3	0,5	0,0	0,6
33	0,3	0,5	1,5	0,6
35	0,3	0,4	0,0	0,5
37	0,3	0,4	0,0	0,5
39	0,3	0,3	0,9	0,3
41	0,1	0,3	0,0	0,4
43	0,2	0,2	0,0	0,2
45	0,1	0,2	0,6	0,2
47	0,1	0,2	0,0	0,2
49	0,1	0,1	0,0	0,1
51	0,1	0,1	0,3	0,1
THDI = 66,4 %				
P_Z/P_{Cu} = 81,4 %				

Tafel ⑥ Rechnung nach Tafel 5 unter der Annahme, der Transformator habe keine die Oberschwingungen dämpfenden Eigenschaften

Analyse der Oberschwingungen in einer Kompakt-Sparlampe Osram Dulux 11 W				
n	U (V)	I_L (mA)	I_N (mA)	P_Z/P_{CuN} (%)
1	232,7	48,9	0,0	3,7
3	0,6	39,1	117,3	21,5
5	4,4	26,4	0,0	27,3
7	2,3	20,0	0,0	30,7
9	0,1	19,2	57,6	46,7
11	0,1	16,6	0,0	52,2
13	0,1	12,7	0,0	42,7
15	0,1	11,0	33,0	42,6
17	0,1	10,2	0,0	47,1
19	0,1	8,7	0,0	42,8
21	0,1	7,7	23,1	40,9
23	0,1	7,3	0,0	44,1
25	0,1	6,1	0,0	36,4
27	0,1	4,9	14,7	27,4
29	0,1	4,2	0,0	23,2
31	0,1	3,6	0,0	19,5
33	0,1	3,0	9,0	15,3
35	0,1	3,3	0,0	20,9
37	0,1	3,1	0,0	20,6
39	0,1	2,5	7,5	14,9
41	0,1	2,5	0,0	16,4
43	0,1	2,5	0,0	18,1
45	0,1	1,9	5,7	11,4
47	0,1	1,8	0,0	11,2
49	0,1	1,9	0,0	13,6
51	0,1	1,6	4,8	10,4
THDI= 79,1 %				
P_Z/P_{Cu}= 701,7 %				

ep-Sonderheft

Rechts-sicherheit

- Rechtsgrundlagen
- Unternehmensorganisation und Delegation von Verantwortung
- Stellung und Aufgaben der Elektrofachkraft
- Umgang mit Fremdfirmen und Leiharbeitern
- Verstöße gegen die Rechtsordnung und deren Folgen
- Einfluss der BetrSichV auf das BG-Regelwerk der Elektrotechnik

für nur 15,– €

Jetzt bestellen!

www.elektropraktiker.de/sonderhefte

oder über den Bestellschein hinten im Heft.

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

- Überraschung 1: Hätte man also von einer Lampe auf 1000 Lampen linear hochgerechnet, hätte man eine Überlastung des Transformators errechnet, die dann nicht eingetreten wäre, da der Trafo die Strom-Oberschwingungen unterdrückt.
- Überraschung 2: Am Ende wäre der 15-kVA-Trafo aber, obwohl nominell nicht überlastet, dennoch zu heiß geworden – aber um wie viel? Wie weit müsste man die Belastung in Anbetracht der Stromverzerrung senken, damit man einen normgemäßen Transformator einsetzen kann und nicht auf Sonderkonstruktionen zurückgreifen muss?

Folgende Überlegung kann helfen:

- Die Kurzschlussspannung charakterisiert den – vorwiegend induktiven – Spannungsfall im Transformator: 4% Kurzschlussspannung bei 50 Hz sind schon fast 12% bei 150 Hz und annähernd 20% bei 250 Hz.
- Der Trafo reduziert daher den Oberschwingungsgehalt des Stroms und senkt so die Scheinleistung von 20 VA auf 15 VA je Lampe und ist daher mit 1000 Lampen nominell genau ausgelastet.
- Der Lastverlust steigt im Quadrat zum Strom und macht bei voller Last (einschließlich Zusatzverlust) etwa 80% der Erwärmung aus.
- Der Zusatzverlust steigt im Quadrat zum Strom und im Quadrat zur Frequenz und macht bei voller Last im Falle reinen 50-Hz-Stroms 10% der Erwärmung aus.
- Wenn das so ist, dann verursacht im Falle des betrachteten verzerrten Stroms allein dessen Grundschwingung einen Zusatzverlust in Höhe von 5,6% des nominellen Lastverlusts.
- Die dritte Oberschwingung jedoch, obwohl kleiner, schlägt schon mit 29,5% zu Buche!
- Und so weiter. Bei der fünften Oberschwingung sind es noch 24,5% (Tafel 5).

So lassen sich die Werte alle aus der Messung (Bild 26) entnehmen und am Ende addieren. Zu den höheren Ordnungszahlen hin werden die Anteile wieder kleiner, weil die höheren Frequenzen ohnehin schon schwächer vertreten sind und dann auch noch wirksamer vom Trafo unterdrückt werden. Zählt man die Anteile bis zur 51. Harmonischen zusammen, so kommt man zu dem Ergebnis, dass der Wirbelstrom-Verlust unter dieser Last nicht 10%, sondern 81,4% der Kupferverluste ausmacht! Die Verlustleistung des Trafos steigt also um rund 70% über den auf dem Leistungsschild und in der Produktspezifikation angegebenen Wert!

In Anbetracht der quadratischen Abhängigkeit des Kupferverlusts, einschließlich Wirbelstromverlust, genügt es also, den Laststrom um etwa 35% zu senken bzw. den Transformator 35% größer zu wählen, als dem ermittelten Laststrom entspräche. Das reicht in jedem Fall, denn diese Beispielrechnung ging vom ungünstigsten Fall aus. Zu einem Nachteil kann dies kaum jemals werden; vielmehr wird in der Regel ein günstigerer Betriebspunkt erreicht, wenn am Ende ein ‚zu großer' Transformator im Einsatz ist, denn den besten Wirkungsgrad hat ein Transformator je nach Auslegung stets zwischen 25% und 50% der Nennleistung.

Informationshalber wurde noch eine zweite Summierung der Zusatzverluste auf der Annahme basierend durchgeführt, die Filterwirkung des Trafos sei nicht vorhanden und die lineare Hochrechnung von einer Lampe auf 1000 Lampen also zutreffend. So gerechnet, wäre der Zusatzverlust nicht ‚nur' 81,4%, sondern sogar 701,7% höher gewesen als bei reinem 50-Hz-Strom! Dies zeigt, dass sich der Trafo durch seine Streureaktanz – nicht nur beim Kurzschluss, sondern auch beim Auftreten von Strom-Oberschwingungen – seinen eigenen Kragen rettet.

Literatur

[5] „Private Haushalte benötigen den meisten Strom für Prozesswärme". Elektropraktiker 5/2013, S. 317.

[6] S. *Fassbinder:* „Energie sparen im Haushalt". Schweizer Zeitschrift für angewandte Elektrotechnik 8/2012, S. 30.

[7] DIN VDE 0100-520 Beiblatt 3:2012-10.

[8] DIN EN 50464-1:2012-06 (VDE 0532-221:2007).

[9] S. *Fassbinder:* „Euroverbundnetz – wie funktioniert das?" Schweizer Zeitschrift für angewandte Elektrotechnik 11/2009, S. 55.

[10] DIN EN 50464-3; VDE 0532-223:2007-12: Ölgefüllte Drehstrom-Verteilungstransformatoren 50 Hz, 50 kVA bis 2500 kVA mit einer höchsten Spannung für Betriebsmittel bis 36 kV – Teil 3: Bestimmung der Bemessungsleistung eines Transformators bei nichtsinusförmigen Lastströmen; Abschnitt 5: Berechnung des Faktors *K* zur Bestimmung der äquivalenten Leistung.

Fortsetzung

Im folgenden Teil werden u. a. Rückwirkungen von Generatoren auf das Netz sowie die verschiedenen negativen Auswirkungen in TN-C- und TN-C-S-Netzen betrachtet

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

Analyse und Auswirkungen von Oberschwingungen

Teil 4: Rückwirkung von Generatoren; Einfluss auf Kondensatoren; Betriebsströme; Blitzströme; Auswirkung im Mittelspannungsnetz

S. Fassbinder, Düsseldorf

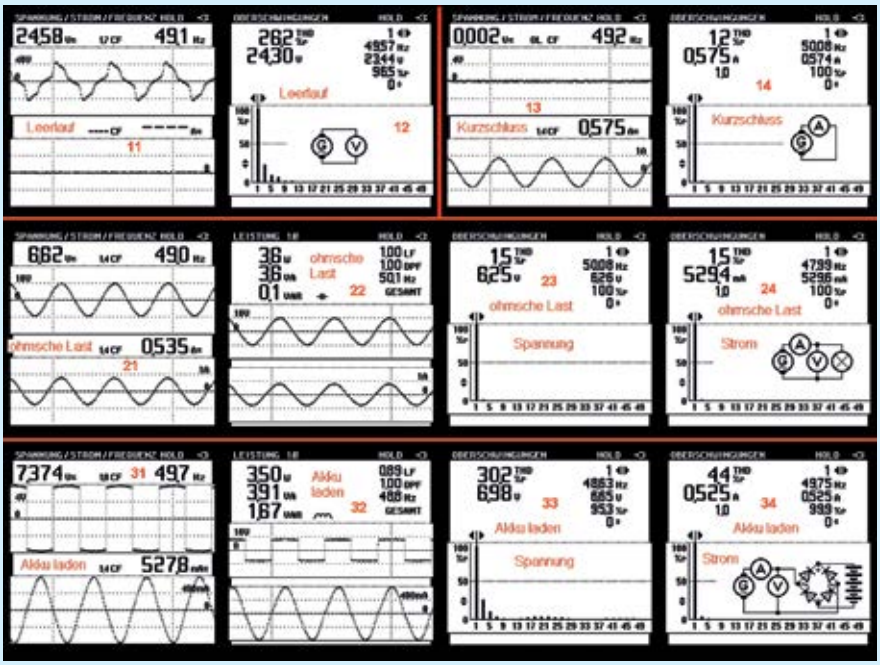
So genannte Oberschwingungen oder auch Harmonische entstehen vorwiegend beim Betrieb elektronischer Betriebsmittel an Wechsel- und Drehstromnetzen. Sie stellen für diese Netze eine zusätzliche und neuartige Beanspruchung dar, für die sie folglich auch nicht ausgelegt waren, was schon für Überraschungen wie Korrosion z. B. am Fundamenterder oder an Wasserrohren sorgte. PC-Netzwerke blieben um mehrere Größenordnungen hinter den versprochenen „Gigabits“ zurück und stürzten ab. Manchmal wurden Neutralleiter heiß, in extremen Einzelfällen bis zum Brand, obwohl doch jede Elektrofachkraft weiß, dass sie einphasige Lasten nur zu gleichen Teilen auf die drei Außenleiter eines Drehstromnetzes verteilen muss, und schon ist der Neutralleiter stromlos. Eben das aber funktioniert heute nicht mehr unbedingt. Dieser Beitrag bietet daher Detailkenntnisse zu Ursachen, Zusammenhängen und Lösungsmöglichkeiten.

5.6 Rückwirkungen von Generatoren auf das Netz

Drehstrom-Synchrongeneratoren, so auch die in Kraftwerken, haben normalerweise recht hohe innere Streuimpedanzen, die zu einer Kurzschluss-Spannung um 40 % führen. Das heißt, die in der Wicklung induzierte Spannung ist 40 % höher als die, die an den Klemmen bei Nennlast noch gemessen wird. So hoch ist der innere Spannungsfall und entsprechend niedrig der Kurzschlussstrom – eigentlich ein willkommener Vorteil. Bei schnellen Laständerungen jedoch müsste die induzierte Spannung über den Erregerstrom entsprechend schnell nachgeregelt werden, und das ist unmöglich. Eine nennenswerte Veränderung des Erregerstroms dauert wegen der noch größeren Induktivität der Erregerwicklung mehrere Sekunden. Spannungseinbrüche bei sprunghaft steigender Last und Überspannungen z. B. bei Lastabwurf sind daher nicht zu vermeiden.

Nicht lineare Lasten sind nun aber solche, deren Impedanzen nicht konstant sind, sondern sich wenigstens zwei Mal pro Periode in erheblichem Ausmaß verändern! Folglich ist die Klemmenspannung nicht mehr sinusförmig, selbst wenn die innere induzierte Span-

Autor
Dipl.-Ing. *Stefan Fassbinder* ist Berater für elektrotechnische Anlagen beim Deutschen Kupferinstitut (DKI), Düsseldorf.



Quelle: S. Fassbinder, ep

㉗ **Messungen an einem Fahrrad-Nabendynamo**

EIB-Basiswissen

Umfassender Einführungskurs in die Gebäudeautomation

- Einsatzgebiete und Funktionsweise
- Tipps zur Programmierung
- Installationsvorschriften
- Blitz- und Überspannungsschutz
- Fachbegriffe und Definitionen

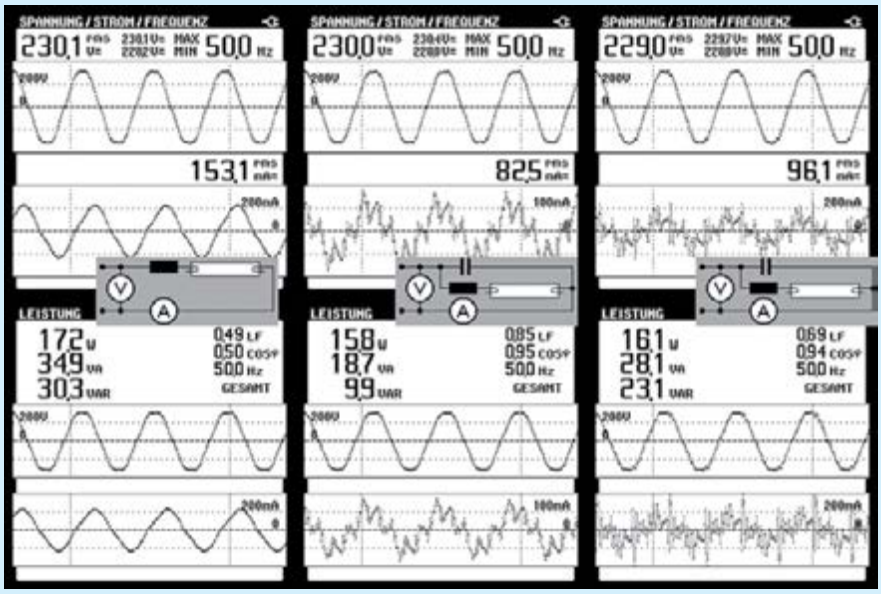
10 % Preisvorteil für ep-Abonnenten

EIB/KNX,
4., aktual. Aufl. 2009, 29,80 €,
Bestell-Nr. 3-341-01540-7,
Autor: K. Frank

Jetzt bestellen!
www.elektropraktiker.de/shop
oder Bestellschein hinten im Heft

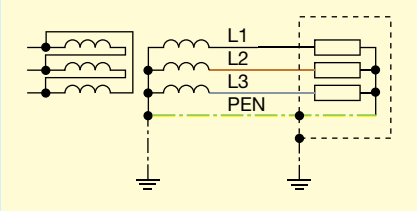
ep shop

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

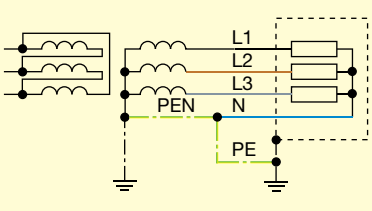


Quellen: S. Fassbinder, ep

㉘ Betrieb einer Leuchtstofflampe 11 W mit KVG, unkompensiert (links) und kompensiert (Mitte und rechts)

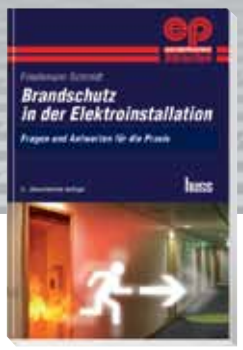


㉙ Für heutige Zwecke nicht mehr geeignet: TN-C-System mit kombiniertem N- und PE-Leiter „PEN“



㉚ Untauglicher Kompromiss: TN-C-S-System – anfangs TN-C, dann weiter geführt als TN-S

nung, die von Physikern so genannte elektromotorische Kraft (EMK), noch so ‚sauber‘ ist. Beides fällt im normalen Netzbetrieb nicht auf, weil stets sehr viele Generatoren parallel arbeiten und die Kurzschlussleistungen sich – je nach Entfernung mehr oder weniger – addieren. Was aber geschieht, wenn eine Anlage unversehens vom Betrieb am öffentlichen Netz auf nur einen Notstrom-Diesel umgeschaltet wird? Dessen innere Impedanz ist um ein Mehrfaches größer als die des Netzes, und plötzlich hat man ungeahnte Verzerrungen der Spannung vorliegen, obwohl der Effektivwert richtig eingeregelt wird. Am besten lässt sich dieses wieder am Extrem-Beispiel veranschaulichen, und das besteht in diesem Fall – wer hätte es vermutet? – aus einem geradezu niedlich keinen Fahrrad-Dynamo, hier einem 28-poligen Nabendynamo, der direkt mit der Drehzahl des Vorderrades läuft, weswegen die Frequenz recht niedrig ist. Beim Schieben des Fahrrades mit Schrittgeschwindigkeit flackert sogar das Licht, ob LED oder Glühlampe. Die früher üblichen 8-poligen ‚Maschinen‘ – wenn dieser Ausdruck für die kleinen Billig-Produkte nicht geschmeichelt ist – bringen es bei 25 km/h auf etwa 250 Hz, doch ansonsten haben sie, abgesehen von den grauenvollen mechanischen Reibungsverlusten, ähnliche elektrische Eigenschaften: Die Leerlaufspannung beträgt bei mittlerer Geschwindigkeit schon ein Mehrfaches der Nennspannung und steigt linear zur Drehzahl. Letzteres gilt ebenso für die Frequenz und damit für die innere Reaktanz. So bleibt bei konstanter Last der Strom oberhalb einer gewissen Geschwindigkeit mehr oder weniger konstant. Der Dynamo ist im physikalischen Sinn keine Spannungsquelle, sondern eine Stromquelle. Obwohl die Leerlaufspannung mangels technischer Präzision dieses Geräts (das Magnetfeld ist bei weitem nicht homogen) alles andere als sinusförmig ist (Bild ㉗ -11 und -12), wird der Strom im Kurzschluss (Bild ㉗ -13 und -14) ebenso wie bei ohmscher Last (Bild ㉗ Mitte) zu einer nahezu reinen Sinusschwingung. Bei ohmscher



Elektroanlagen brandsicher errichten

- Leitfaden mit allen aktuellen Bestimmungen und Richtlinien zur brandschutzgerechten Elektroinstallation
- Theoretisches Wissen wird in Zusammenhängen vermittelt, die typisch für den beruflichen Alltag sind
- Praxisorientierte Beispiele machen das Buch zu einem Nachschlagewerk für Planer und Praktiker

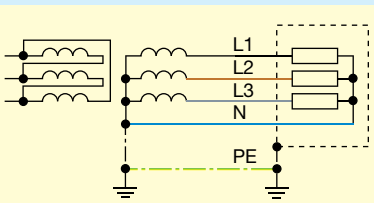
10 % Preisvorteil für ep-Abonnenten

Brandschutz in der Elektroinstallation, 5. überarb. Aufl. 2010, 29,80 €, Bestell-Nr. 3-34H-01585-8, Autor: F. Schmidt

Jetzt bestellen!
www.elektropraktiker.de/shop
oder Bestellschein hinten im Heft

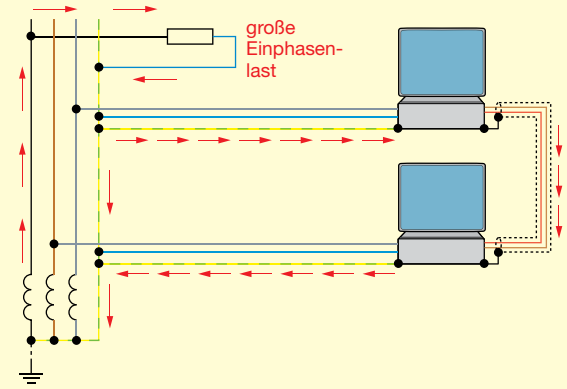
ep shop

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

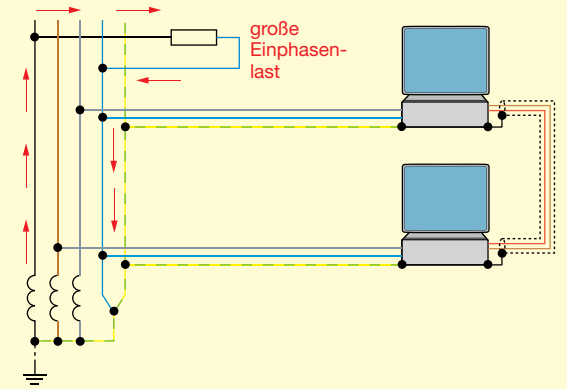


Quellen: S. Fassbinder, ep

㉛ Für heutige Zwecke einzig geeignet: TN-S-System mit separaten Leitern N und PE



㉜ Im TN-C-System können sich dem PEN-Leiter zugedachte Betriebsströme nach Belieben auf alle geerdeten Teile aufteilen, einschließlich Schirme von Datenleitungen



㉝ Nur im TN-S-System ist das Erdungssystem frei von Betriebsströmen und daher in der Lage, allen vernetzten EDV-Geräten gleiches Potential zuzuweisen

㉞ Dieses Bandeisen passierte im TN-C-Zeitalter eine Trafostation in wenigen Metern Abstand. Die dem Trafo zugewandte Seite ist durch Metall-Abtrag scharfkantig geworden, …

㉟ … die andere nicht.

Last gilt dies in der Folge auch für die Spannung, die im Leerlauf noch ziemlich wüst aussah.

Der gleiche Effekt zeigt sich in umgekehrter Richtung beim Speisen auf einen Brückengleichrichter mit nachgeschaltetem Akkumulator im Ladebetrieb: Die Spannung erscheint als wechselgerichtetes Abbild der Akkumulator-Gleichspannung, also als Rechteckschwingung, doch der Strom behält seine Sinusform – anders herum als von herkömmlichen Spannungs-Versorgungsquellen her gewohnt und erwünscht.

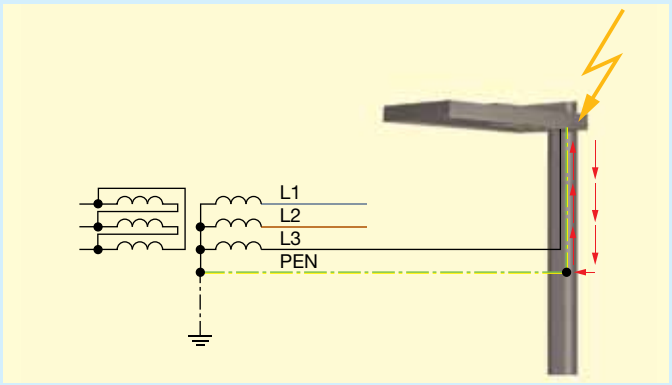
Je höher die innere Impedanz der Quelle, vor allem der induktive reaktive Anteil, desto mehr nimmt eine jede Stromversorgungsanlage von dieser normalerweise unerwünschten Charakteristik an. Dadurch kann es zu allerlei sonderbaren Effekten kommen, etwa zusätzliche Nulldurchgänge. Dies lässt z. B. leistungselektronische Steuerungen, die sich an den Nulldurchgängen orientieren, konfus reagieren, angefangen z. B. mit Netzsynchronuhren, die um mehrere Stunden am Tag vorgehen.

5.7 Einfluss auf Kondensatoren

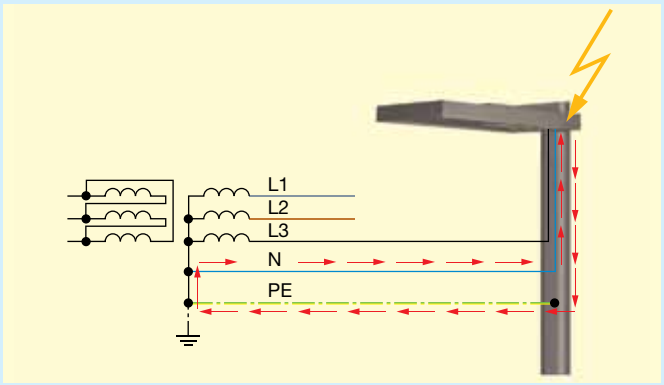
Bei höheren Frequenzen haben Kondensatoren naturgemäß eine geringere Impedanz und lassen entsprechend mehr Strom passieren. Höherfrequente Beimischungen zur Netzspannung, die als solche mit einem einfachen Netzanalysator mit Oszilloskop-Funktion in der Spannungskurve noch nicht sichtbar werden, verraten sich dann in der Stromkurve. Hier wurde eine 11-W-Leuchtstofflampe mit KVG in einem Bürogebäude betrieben – mit einem ziemlich schlechten KVG noch dazu, wie man sieht, da die Gesamt-Wirkleistung 17 W übersteigt. Das ist aber hier nicht das Thema, ebenso wenig wie das außerordentlich hohe Maß an Grundschwingungs-Blindleistung, das natürlich kompensiert werden sollte (Bild ㉘ links). Nicht nur der Diagrammlinie, sondern auch den Zahlen sieht man an, dass der Strom kaum verzerrt ist, da der Grundschwingungs-Leistungsfaktor cosφ und der Gesamt-Leistungsfaktor λ (hier LF) ohne Kompensation fast gleich sind.

Mit Parallel-Kompensation jedoch kommt es an den Tag: Der Strom, der zuvor nahezu sinusförmig verlief, enthält jetzt auf einmal jede Menge höherer Frequenzanteile (Bild ㉘ Mitte). Da nichts weiter als der parallel angeordnete Kompensations-Kondensator hinzu gekommen ist, muss dieser für die auffällige Veränderung des Gesamtstroms ursächlich sein und die hinzu gekommenen höherfrequenten Ströme leiten. Eine vollständige Kompensation ist trotz richtiger Bemessung des Kondensators nicht mehr möglich: Fast 10 var bleiben übrig. Der cosφ hat sich natürlich erheblich verbessert, denn das war der Sinn der Sache; der Gesamt-Leistungsfaktor λ jedoch nicht so sehr. Der Abstand zwischen beiden hat sich verzehnfacht. Hier stecken die restlichen 10 var: Verzerrungs-Blindleistung. Diese fließt zwar unvermeidbar durch den Kondensator,

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)



㊱ Die Blitzstoßspannung findet im TN-C-System eine Abkürzung von fremden leitfähigen Teilen zu elektrischen Betriebsmitteln vor



㊲ Die Blitzstoßspannung muss im TN-S-System große Umwege in Kauf nehmen, um von fremden leitfähigen Teilen zu elektrischen Betriebsmitteln zu gelangen

Quellen: S. Fassbinder, ep

wird aber wegen der hohen Induktivität des KVG nicht durch einen entsprechenden phasenverschobenen Strom im KVG kompensiert. Dem Netz ist es zwar nur recht, diese höherfrequenten Blindströme durch den Kondensator loszuwerden, doch dieser war für 250 V und 50 Hz ausgelegt. Eigentlich sollte nun $\cos\varphi = \lambda = 1$ sein. Damit, also mit der Kompensation der Grundschwingungs-Blindleistung der Leuchte (bzw., genauer gesagt, des KVG) ist der Kondensator schon ausgelastet. Zusätzlich wird er nun aber noch mit rund 10 var höherer Frequenzen belastet. Jedenfalls wenn der Stromrichter gesteuerte Aufzug in dem Gebäude still steht, ist das so. Wenn dieser fährt, steigt der Wert gleich auf 23 var (Bild ㉘ rechts)! Dabei handelt es sich noch nicht einmal um Oberschwingungen, sondern um beliebige, durch den Umrichter hervorgerufene höhere Frequenzen. Der $\cos\varphi$ und der Gesamt-Leistungsfaktor λ klaffen jetzt noch weiter auseinander. Die nicht bestimmungsgemäße Belastung des Kondensators steigt entsprechend, denn seine bestimmungsgemäße Grundlast ist gleich geblieben.

5.8 Betriebsströme im PA: Magnetische Streufelder

Damit jedoch zu jenen Folgen, die nur in für heutige Verhältnisse ungeeigneten Netzen auftreten können. Dazu zählen, wie nun schon seit vielen Jahren diskutiert, das TN-C-System, bei dem man den Rückleiter N (Neutralleiter) mit dem Schutzleiter PE (‚Erde') zum PEN-Leiter kombiniert hat (Bild ㉙), und das Zwischending TN-C-S (Bild ㉚) zwischen diesem und dem TN-S-System mit separaten Leiten N und PE (Bild ㉛).

In einem TN-C-System – und folglich zu weiten Teilen auch in einem TN-C-S-System – können sich die Rückleiterströme unkontrolliert zwischen dem PEN-Leiter und allen daran geerdeten Teilen aufspalten. Entsprechend unkontrollierbar werden die Abstände zwischen Hin- und Rückleiter des Stroms. Magnetfelder breiten sich aus. 25 A fand jemand in einem Treppengeländer, 30 A ein anderer auf einem Gasrohr. Wasserleitungen korrodieren, selbst wenn sie aus Edelstahl bestehen. Die alten Kathodenstrahl-Bildröhren neigten zum Flimmern. Weitere Störungen kamen hinzu.

5.9 Betriebsströme in der EDV: Datenfluss gehemmt

Für den ungestörten Betrieb komplexer Anlagen ist heute die Anwendung des TN-S-Systems (Bild **31**) unumgänglich. Verantwortlich sind dafür zwei gegenläufige Tendenzen, veranschaulicht in Bild ㉜ und Bild ㉝:

- Vernetzte EDV-Anlagen benötigen eine ‚ruhige Erde' als Bezugspotential. Kann der PEN-Leiter seine traditionelle Sicherheitsfunktion, die geforderte Begrenzung der Berührungsspannung auf 50 V, noch ganz locker gewährleisten, so muss er vor dieser neuen Aufgabe als Funktions-Erdungsleiter jedoch kapitulieren, denn die Signale können (beim Empfänger) Pegel unter 1 mV aufweisen.
- Gerade durch die vermehrte Belastung des Neutralleiters – nicht mehr nur durch Unsymmetrieströme, sondern zusätzlich durch die sich addierenden Oberschwingungen durch 3 teilbarer Ordnungszahlen (z. B. aus den Stromversorgungen für eben diese EDV-Geräte) – wird eine ‚TN-C-Erde' aber noch ‚unruhiger' als sie ohnehin schon ist. Die Endgeräte verstehen sich

10 % Preisvorteil für ep-Abonnenten

Explosionsschutz elektrischer Anlagen,
3. Aufl. 2008, 48,00 €,
Bestell-Nr. 3-341-01526-1,
Autor: J. Pester

Verantwortungsbewusst handeln!

Darin enthalten:

- Explosionssicherheit
- Explosionsgefahren
- Planung und Auftragsannahme
- Zündschutzarten
- Eigensichere Anlagen

Jetzt bestellen!

www.elektropraktiker.de/shop
oder Bestellschein hinten im Heft

ep shop

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

dann untereinander und mit der Zentrale nicht mehr.

Eher selten, aber auch schon vorgekommen sind Überhitzungen an ebenfalls in den Potentialausgleich einbezogenen Teilen der Funktions-Erdungsleiter, die aber über kleinere Querschnitte verfügen als die Stromleiter. Die Schirme der Datenleitungen – beidseitig geerdet – können sich erwärmen bis zur ‚Hotline'.

„Das TN-C-Netz ist eine elektrische Kloake", ließ ein Gutachter verlauten. „Man lässt hier Ströme einfach unkontrolliert im Gebäude versickern. Was in der Sanitärtechnik ins finstere Mittelalter gehört, wird in der Elektro-Installation zum Teil noch heute als Stand der Technik angesehen. Das stinkt zum Himmel!"

5.10 Betriebsströme im Erder: Korrosionsschäden

Auch wenn die Lehrmeinung Jahrzehnte lang lautete, elektrochemisch induzierte Korrosion könne nur bei Gleichstrom auftreten, mehren sich in den letzten Jahren Stimmen unter den Chemikern, die dies für ein altes Gerücht halten. Schließlich bedeutet Stromfluss durch Wasser fast immer, dass ein Stoff vom atomaren Zustand in Ionen übergeht, während ein anderer den umgekehrten Weg nimmt. Dieser Vorgang ist nicht selbstredend durch Umkehr der Stromrichtung rückgängig zu machen.

Am Flughafen Paderborn-Lippstadt, dessen Elektroanlagen in den Neunzigern komplett vom TN-C- auf das TN-S-System umgerüstet wurde, was u. a. für eine Reihe von Messungen genutzt wurde, wurde im Zuge dieser Umrüstung ein Banderder aus (ehemals) verzinktem Stahl ausgegraben. Dieser Erder war im TN-C-System selbstverständlich mehrfach mit dem PEN-Leiter verbunden gewesen – hatte also gleichsam als dessen ‚Entlastungsleiter' gedient – und war etwa 10 Jahre lang mit einem Betriebsstrom um 5 A belastet gewesen. Das hier abgebildete Stück führte im Abstand von wenigen Metern an der Trafostation vorbei. Die dem Transformator zugewandte Seite (Bild ㉞) ist durch Material-Abtrag messerscharf geworden, die abgewandte eher rund oder kaum verändert (Bild ㉟).

Man kann nur mutmaßen, dass der ungleiche Abtrag etwas mit der ständigen Strombelastung zu tun hat, aber nahe liegt es schon. Es ist nicht zu vermuten, dass hier jemals Gleichstrom geflossen ist, aber das Abgangskabel der Station wies, über alle 3 Außenleiter und den PEN-Leiter gemessen, einen Fehlbetrag von 25 A auf, der statt dessen durch das Erdungssystem über den geerdeten Trafokessel zurück zum Sternpunkt geflossen sein muss – ein Fünftel davon also über besagtes Stück Banderder; der Rest? Wer weiß das schon?

Mittlerweile ist dort ein sauberes TN-S-System installiert worden, der Sternpunkt ist nicht mehr, wie früher allgemein üblich und in alten Normen sogar noch vorgeschrieben, am Kessel geerdet, und alle früher häufigen Schäden, auch Korrosion an Erdern, sind bislang nicht wieder aufgetreten.

5.11 Blitzströme in Geräten und Betriebsmitteln

Auch vor den Blitzschäden hat man jetzt Ruhe. Bis zur Umrüstung kostete jedes der dort häufigen Gewitter etwa 10 bis 20 Landebahn-Befeuerungsleuchten – ein teurer Spaß bei dem dort zum Einsatz kommenden Spezial-Material. Wie die Betriebsströme vom PE/PA-System fern gehalten werden müssen, müssen auch die Störströme, vor allem Blitzteilströme, von den aktiven Leitern fern gehalten werden. Im TN-C-System indes haben sie leichtes Spiel. Beim Einschlag in eine mechanische Struktur findet sich meist ein kurzer Weg bis zum nächsten elektrischen Betriebsmittel (Bild ㊱).

Im TN-S-System hingegen ist der Weg sehr weit; führt er doch zwangsläufig erst zum zentralen Erdungspunkt, der einzigen Verbindung zwischen N- und PE-Leiter, und von dort wieder zurück. Bis dahin hat sich das hitzige Temperament des Blitzes schon stark abgekühlt (Bild ㊲) – oder es hat sich um einen Jahrhundertblitz gehandelt, der ohnehin die Isolation durchschlagen und die Abstände übersprungen hätte. Gegen diese ist kein Kraut gewachsen.

5.12 Auswirkung im Mittelspannungsnetz: Erdschlusslöschung gelöscht!

Abhängig von der ‚Sternpunktbehandlung' können schädliche Auswirkungen sogar bis in das Mittelspannungsnetz hinauf reichen. Diese wurden erst vor kurzem im Elektropraktiker ausführlich erläutert [11]. Man unterscheidet dabei

- den isolierten Sternpunkt ohne jede Sternpunkterdung OSPE,
- die starre Sternpunkterdung SSPE,
- die niederohmige Sternpunkterdung NOSPE,
- die kurzzeitige niederohmige Sternpunkterdung KNOSPE und
- die Resonanzsternpunkterdung RESPE.

Die letztgenannte, geradezu geniale und daher weit verbreitete Methode beruht auf dem Umstand, dass Fehler in einem ungeerdeten Netz meist einpolige Lichtbogenfehler gegen Erde sind. Der Fehlerstromkreis schließt sich hierbei über die Erdkapazitäten der beiden verbleibenden Außenleiter. Die Reaktanzen dieser Kapazitäten sind bei 50 Hz vergleichsweise hoch, und der Lichtbogenstrom ist entsprechend gering, aber allemal groß genug, um Menschen und Tieren gefährlich zu werden oder Brände zu entfachen, aber vom Kurzschlussschutz bleibt dieser Fehler unbemerkt. Da der Spannungsfall an einem Lichtbogen nur irgendwo in der Gegend von 35 V liegt, ist der fehlerbehaftete Außenleiter praktisch geerdet und der Fehlerstrom ein kapazitiver Blindstrom. Dieser wird durch einen induktiven Strom durch eine so genannte Petersen-Spule zwischen Sternpunkt und Erde kompensiert, und so verlischt der Lichtbogen von selbst sofort wieder, kaum dass er entstanden ist. Die Induktivität dieser Spule muss natürlich immer genau passend zum jeweiligen Netz ausgelegt werden. Bei Erweiterungen oder Umbauten am Netz muss die Induktivität entsprechend angepasst werden, sonst funktioniert die selbsttätige Löschung nicht mehr.

Heikel wird die Sache jedoch auch, wenn zwar das Netz gleich bleibt, die Art der Belastung sich aber ändert; ist doch die Reaktanz der Petersen-Spule für die Netzfrequenz von 50 Hz bemessen. Das war beinahe 100 Jahre lang völlig richtig. Beispielsweise die fünfte Spannungs-Oberschwingung erzeugt jedoch einen 5 Mal so hohen kapazitiven Strom wie die Grundschwingung, während in der Induktivität nur ein Fünftel des Stroms zum Fließen kommt. Der Resonanzpunkt wird also um den Faktor 25 verfehlt, und ein Anteil von 4 % der fünften Oberschwingung in der Netzspannung lässt den Lichtbogenstrom schon um 20 % steigen, wovon die Petersen-Spule nur 0,8 % kompensiert. Der Lichtbogen wird also weiter brennen – und wer bemerkt das? Man glaubt doch, ein ‚gelöschtes' Netz zu betreiben!

Literatur

[11] *S. Fassbinder:* Oberschwingungen stören die Erdschlusslöschung. Elektropraktiker Berlin 66 (2012) 8, S. 646–649.

Fortsetzung

Im folgenden Teil werden aktive und passive Abhilfemaßnahmen sowohl für die Netz- als auch die Geräteseite beschrieben.

Hinweis

Ein weiterer aufmerksamer Leser, Herr *Benjamin Süß,* merkt an, dass die Begriffe „Oberschwingungen" und „Harmonische" in der Fachwelt uneinheitlich und auch hier nicht normgerecht verwendet werden. Theoretisch kann eine erste Oberschwingung nicht mit der Grundschwingung identisch sein, welche als erste Harmonische bezeichnet wird; so entspricht eigentlich die erste Oberschwingung der zweiten Harmonischen, die zweite Oberschwingung der dritten Harmonischen und so fort. Dies wurde jedoch vom Autor als ebenso verwirrend empfunden, der statt dessen durchgängig die Begriffe „Oberschwingung" und „Harmonische" als Synonyme verwendet, wie es (leider) in fast der gesamten Fachwelt Brauch geworden ist und durch entsprechende Formulierungen klar werden sollte.

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

Analyse und Auswirkungen von Oberschwingungen

Teil 5: Abhilfemöglichkeiten auf Netz- und Geräteseite

S. Fassbinder, Düsseldorf

So genannte Oberschwingungen oder auch Harmonische entstehen vorwiegend beim Betrieb elektronischer Betriebsmittel an Wechsel- und Drehstromnetzen. Sie stellen für diese Netze eine zusätzliche und neuartige Beanspruchung dar, für die sie folglich auch nicht ausgelegt waren, was schon für Überraschungen wie Korrosion z. B. am Fundamenterder oder an Wasserrohren sorgte. PC-Netzwerke blieben um mehrere Größenordnungen hinter den versprochenen „Gigabits“ zurück und stürzten ab. Manchmal wurden Neutralleiter heiß, in extremen Einzelfällen bis zum Brand, obwohl doch jede Elektrofachkraft weiß, dass sie einphasige Lasten nur zu gleichen Teilen auf die drei Außenleiter eines Drehstromnetzes verteilen muss, und schon ist der Neutralleiter stromlos. Eben das aber funktioniert heute nicht mehr unbedingt. Dieser Beitrag bietet daher Detailkenntnisse zu Ursachen, Zusammenhängen und Lösungsmöglichkeiten.

6 Maßnahmen

Bis hierhin wurden die Entstehung und Ausbreitung von Oberschwingungen ausführlich beschrieben – und nun? Welche Maßnahmen sind angebracht, und welche eher nicht? Wann sind überhaupt Maßnahmen erforderlich? Wie schon ausgeführt, sind Oberschwingungen nämlich nicht per se ein Problem. Auf die Einhaltung normativer Grenzen wird noch einzeln einzugehen sein, doch hilft dies, wenn, dann eher gegen juristische als gegen technische Schwierigkeiten. „Wir sind hier nicht zusammengekommen, um Normen zu erfüllen, sondern um Störungen zu beseitigen und Schäden zu verhüten!“ So der Seminarleiter zur Eröffnung einer Schulung zum Thema [12]. Wie schon erwähnt, können Störungen und im Extremfall Schäden selbst dann eintreten, wenn alle normativen Vorgaben eingehalten wurden. Umgekehrt müssen sie nicht notwendigerweise eintreten, wenn die Grenzwerte überschritten werden.

Im Allgemeinen sagt man: Müll, der gar nicht erst entsteht, muss auch nicht entsorgt werden. Vermeidung ist also besser als Entsorgung. In diesem speziellen Fall jedoch muss dieser Ansatz, auch wenn er deutlich mehr von sich reden macht, als schlichtweg unwirtschaftlich betrachtet werden; bedeutet dies doch, dass sich jede kleine Lampe um ihre Oberschwingungen ‚selbst kümmern muss‘. Das ist so, als wenn man die öffentliche Müllabfuhr abschafft, um die Kosten zu senken, und dann jeder seinen eigenen Müllsack einzeln mit dem eigenen Auto zur Müllkippe – Entschuldigung, zum „Entsorgungshof“ – fährt.

Autor
Dipl.-Ing. *Stefan Fassbinder* ist Berater für elektrotechnische Anlagen beim Deutschen Kupferinstitut (DKI), Düsseldorf.

6.1 Auf der Netzseite

Wirtschaftlicher ist der Ansatz, die Netze in der Art zu ertüchtigen, dass ihnen die Oberschwingungen nichts mehr ausmachen. Dies ist dann gegeben, wenn ein hoher Grad an Stromverzerrung THDi nahezu ungestört und ‚unstörend‘ abfließen kann. Das bedeutet:

1. Die Wirkwiderstände im gesamten Leitungsweg, also einschließlich Transformatoren, so gering halten, dass die Erhöhung der effektiven Belastung der Leiter getragen werden kann, ohne die zulässige Erwärmung zu überschreiten.
2. Die induktiven Längsreaktanzen im gesamten Leitungsweg, also einschließlich Transformatoren, so gering halten, dass die harmonischen Spannungsfälle sich in für den jeweiligen Anwendungsfall vertretbaren Grenzen halten, also nicht mehr viel THDu entsteht.

Somit sollten alle Leiter so kurz und so dick wie möglich ausgewählt werden. Während bei der Leitungslänge bei richtiger Planung kein Potential mehr zu finden sein dürfte, kann die Verstärkung der Querschnitte hier noch gute Dienste leisten.

Transformatoren werden wegen der doppelt erhöhten Erwärmung durch „Zusätzliche Zusatzverluste“ (Abschnitt 5.5.1) ohnehin überdimensioniert werden müssen. Ihren Anteil an Streureaktanz werden sie immer benötigen, um im Falle eines Kurzschlusses ihren eigenen Kragen zu retten, indem sie den Kurzschlussstrom begrenzen und sich dadurch vor augenblicklicher Zerstörung durch die inneren magnetischen Kräfte bewahren. Es ist also besser, bei den gängigen Normtypen mit $u_k = 4\,\%$ oder $u_k = 6\,\%$ zu bleiben und eine Leistungsstufe höher zu gehen als eine Spezialversion mit z. B. $u_k = 2\,\%$ zu wählen – schon allein deshalb, weil man dann bei der Planung und Auswahl weiterhin mit den gewohnten Planungsprogrammen und den darin vorgesehenen Werten planen und rechnen kann.

Das Ergebnis ist eine Anlage, die hinsichtlich Bemessungsstrom, Kurzschlussstrom und Abschaltbedingungen eine oder einige Standardgrößen höher liegt als sei nur eine Belastung durch lineare Lasten vorhanden. Liegt die zusätzliche Belastung im praktischen Betrieb nachher nicht so hoch wie bei der Planung mit ‚Angstfaktor‘ kalkuliert, ist diese Auswahl dennoch vorteilhaft. Es sei hierbei nur an die bessere Spannungshaltung und die reduzierten Energieverluste innerhalb der Anlage erinnert.

6.1.1 Passive Methoden: Induktivitäten

Nur selten sind diese Maßnahmen zum besseren Abfluss der Strom-Oberschwingungen nicht ausreichend oder nicht wirtschaftlich, so dass man diesen statt des Abflusses einen geschlossenen Stromkreis anbieten muss. Man muss dann eine Oberschwingungssenke möglichst dicht an deren Quelle anordnen. Gut bewährt hat es sich hierfür, die Verdrosselung von Blindstrom-Kompensationsanlagen

Quelle: KBR Kompensationsanlagenbau

㊳ **Klein und dezentral – dreiphasige verdrosselte Blindstrom-Kompensationsanlage**

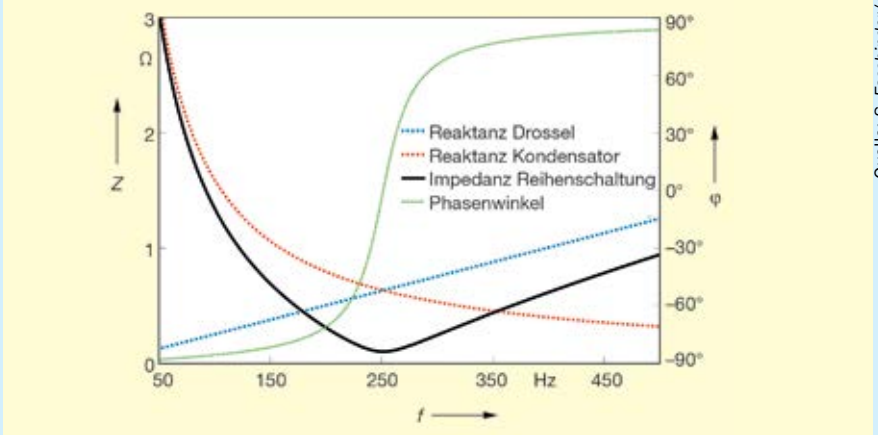
lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

gleich als passive Filter auszuführen (Bild ㊳). Die „Verdrosselung“ genannte Praxis, Kompensations-Kondensatoren mit je einer Drosselspule in Reihe zu schalten, wird heute meistens ohnehin vorgenommen, um die Kondensatoren vor Überlastung zu schützen (Abschnitt 5.7). Zumindest wird dies dringend empfohlen. Oberhalb der Resonanzfrequenz sieht die verdrosselte Kapazität wie eine Induktivität aus, und eine Induktivität kann nicht mit der Streuinduktivität des nächsten Transformators in Resonanz geraten.

Die Verdrosselung wird dabei so gewählt, dass sie von der Bemessungs-Blindleistung des Kondensators nur einige Prozent wegnimmt. Bemisst man sie so, dass sie zusammen mit dem Kondensator einen Reihen-Resonanzkreis (Saugkreis) für eine bestimmte Harmonische bildet, so hat dieser Kreis für diese eine Frequenz nahezu keine Impedanz (Bild ㊴). Die induktive und die kapazitive Reaktanz heben sich gegenseitig auf und nur der sehr geringe Wicklungswiderstand der Drossel bleibt übrig. Wählt man z. B. einen Verdrosselungsgrad von 11 %, also ungefähr 1/9, dann hat die Drosselspule bei der Netzfrequenz von 50 Hz gerade 11 % der Reaktanz, die der Kondensator hat. Bei 150 Hz dagegen steigt die induktive Reaktanz schon auf das Dreifache, die kapazitive aber fällt auf ein Drittel. Aus 1:9 wird 3:3, die beiden Reaktanzen sind dem Betrag nach gleich groß, aber gegeneinander um 180° phasenversetzt, und heben sich also gegenseitig auf. Für eine eventuell vorhandene dritte Oberschwingung liegt ein Kurzschluss vor – und weg ist sie. So einfach ist das.

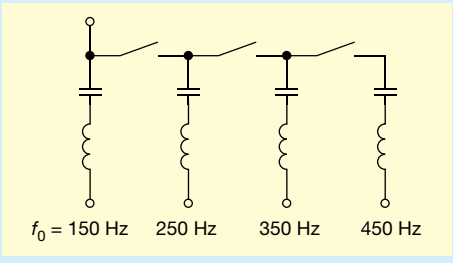
Der Vorteil dieser Anordnung ist ihre Einfachheit und Robustheit und ggf. das Zurückgreifen auf Komponenten, die für andere Zwecke ohnehin schon vorhanden sind. Damit ist sie auch sehr kostengünstig. Der Nachteil ist, dass jeder Saugkreis nur für eine bestimmte Frequenz bemessen werden kann und folglich so viele Saugkreise errichtet werden müssen, wie Frequenzen zu beseitigen bzw. zu dämpfen sind. Ist eine verdrosselte Kompensationsanlage in Stufen einstellbar ausgeführt, so ist es unter Umständen vertretbar, in Schwachlastzeiten, wenn die Anlage zurück geschaltet wird, auf die Filterung der weniger intensiven Pegel zu verzichten, die dann auf Grund der Schwachlast noch weniger intensiv auftreten (Bild ㊵). Auch ist diese Methode natürlich nicht geeignet, um Störungen veränderlicher Frequenz (Zwischenharmonische, deren Frequenzen nicht ganzzahlige Vielfache der Netzfrequenz sind) zu filtern, wie sie beim Betrieb von Frequenzumrichtern im Netz auftreten können.

Ein weiterer Nachteil ist, dass die Saugkreise ihrem Namen alle Ehre machen und jede nur erdenkliche Menge Strom der fraglichen Frequenz auf sich ziehen, so viel wie eben vorhanden ist – und mehr als das, da eine geringere Impedanz (für höhere Frequenzen) die Oberschwingungs-Emission jedes einzelnen Verursachers erhöht (s. Abschnitt 2). Die Motivation der Anlagen-Errichter hält sich in Grenzen, die Oberschwingungen des Nachbarn gleich mit zu entsorgen, so dankbar der auch sein mag. Doch genau dies wird ein Saugkreis tun, da er einen Quasi-Kurzschluss bei der Resonanzfrequenz darstellt. Der Resonanzkreis kann nicht unterscheiden, woher ein Oberschwingungsstrom stammt. In welchem Ausmaß es zum Aufräumen von anderer Leute



Quelle: S. Fassbinder/ep

▲ ㊴ **Verhalten eines mit 4 % verdrosselten Kondensators**



◀ ㊵ **Verdrosselte Blindstrom-Kompensation, aufgebaut zur gleichzeitigen Verwendung als Oberschwingungsfilter**

Schaltanlagen berechnen und entwerfen

Darin enthalten:

- Schaltanlagen im Elektroenergiesystem
- Baueinheiten von Schaltanlagen als selbstständige Geräte
- Methoden zur Beschreibung und Optimierung von Baueinheiten
- Isoliervermögen
- Größe der Baueinheiten und Leistungsübertragung
- Lichtbogenschutz
- Kapselung

Mittelspannungstechnik, 2., akt. u. erw. Aufl., 68,00 €, Bestell-Nr. 3-341-01495-0, Autor: H. Boehme

Jetzt bestellen!

www.elektropraktiker.de/shop
oder Bestellschein hinten im Heft

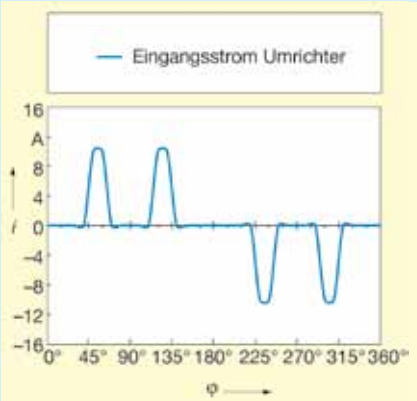
epshop

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

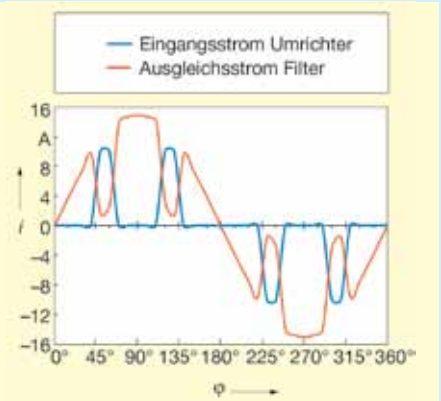
Schmutz kommen wird, lässt sich im Vorhinein nicht ermitteln.
Wie schon im Zusammenhang mit dem Transformator ausgeführt (Abschnitt 5.5.2), hängt es nicht nur von der Oberschwingungen verbreitenden Last, sondern auch von ihrer Umgebung ab, wie viel Oberschwingungsstrom sie denn nun emittiert. In dem Moment, in dem der Filter eingesetzt wird, kann der Strom der betreffenden Oberschwingung sich deutlich verstärken und den Filter überlasten.
Ein Hersteller von Kompensations-Anlagen hat vor langer Zeit beim Westdeutschen Rundfunk in Köln diesen Alleingang gewagt. Dort waren alle Mikrofon-Leitungen mit einem Störbrummen belastet, verursacht durch zunehmenden Einsatz von Schaltnetzteilen und anderen Gleichrichter-Anlagen zusammen mit einer ungeeigneten Stromversorgung nach dem TN-C-System – ein typischer Fall der u. a. in Abschnitt 5.3 beschriebenen Störungen. Die technisch ideale Lösung – Kompensation und Filterung jeweils am Ort der Entstehung oder zumindest in jeder Unterverteilung – war nicht zu bezahlen. Es wurde eine gesamte Oberschwingungs-Emission von etwa 10 A ermittelt und vorsichtshalber aus Reservegründen eine Saugkreis-Kompensation mit einem Bemessungsstrom von 20 A in der Hauptverteilung installiert.
Erstaunlicherweise wurden bei Inbetriebnahme der Anlage dann aber 50 A Verzerrungsstrom gemessen. – Erstaunlich? Nein, nicht wirklich. Weil es sich aber, ganz abgesehen von dem dabei empfundenen Verdruss, niemand leisten kann, vor den Türen sämtlicher Nachbarn gleich mit zu kehren, unterbleibt diese an sich optimale Art des Umgangs mit stationären Niederfrequenz-Immissionen in das Stromversorgungsnetz meist. Die Hersteller scheuen einen ‚Volltreffer' und ziehen den Einsatz ‚verstimmter' Schwingkreise vor, deren Resonanzfrequenzen knapp neben den Oberschwingungsfrequenzen liegen. Das bringt zwar nicht den vollen Effekt, hilft aber auch schon.
Dabei hielten sich die Kosten für den zusätzlichen Aufwand im Rahmen. Außerdem gäbe es noch eine weitere Möglichkeit, dieses Problems ohne Verlust an Filterleistung Herr zu werden:
Man könnte die Drosselspulen so auslegen, dass der Eisenkern bereits bei einem Strom in die magnetische Sättigung eintritt, bei dem die Spule thermisch noch nicht überlastet wird. An diesem Punkt fängt die Induktivität an zu fallen, die Resonanzfrequenz erhöht sich, entfernt sich von der Frequenz der betreffenden Oberschwingung und die Impedanz des ‚Nicht-mehr-Resonanzkreises' steigt rapide an. Ein sich selbst regelndes Verhalten wäre geschaffen.

6.1.2 Aktive Methoden: Pulsweiten-Modulation (PWM)

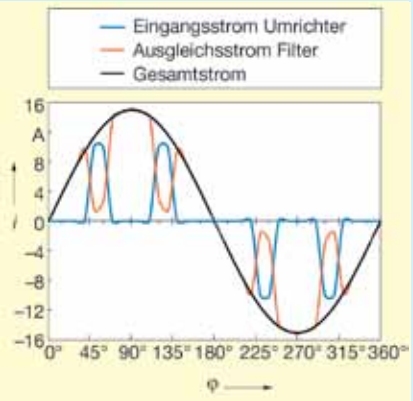
Die vornehme Methode des Aufsaugens von Oberschwingungsströmen ist jedoch die leistungselektronische:
Ein Prozessor erfasst quantitativ und qualitativ, inwieweit sich die Spannungskurve im Netz von der gewünschten Sinusform unterscheidet, und speist von jeder gefundenen Schwingung einen derart bemessenen Strom mit umgekehrtem Vorzeichen ein, dass die Spannungskurve wieder stimmt. Dies schließt Zwischenharmonische ebenso ein wie aperiodische Vorgänge – ein klarer Vorteil. Eine Überlastung kann ebenso durch die elektronische Regelung ausgeschlossen werden. Die Netzreinigung bleibt dann eben unvollkommen, wenn mehr Schmutz vorhanden ist als der Universal-Staubsauger schlucken kann, aber er quittiert den Dienst nicht gleich ganz, nur weil er nicht alles schafft.
Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Elektronik stromgeführt anzusteuern und somit genau den Schmutz eines bestimmten Verbrauchers oder Abgangs zu absorbieren – nicht mehr und nicht weniger als eben diesen, etwa den Eingangsstrom eines Frequenzumrichters (Bild ㊶). Dieser Stromverlauf wird von der ersehnten Sinuskurve abgezogen und die Differenz in das Netz eingespeist (Bild ㊷).
So entsteht wieder ein Sinusstrom (Bild ㊸) – zumindest wenn man nur diesen einen Störer und ‚seinen' Filter zusammen betrachtet. Natürlich muss ein solches netzparalleles Gerät die Amplitude der Sinuskurve stets so einregeln, dass sich aufgenommene und abgegebene Energie über eine Periode oder höchstens zwei bis drei Perioden hinweg die Waage halten, denn nennenswerte Energiespeicher enthält er nicht, nur Induktivitäten und Kapazitäten, bzw. deren jeweils nur eine im Zwischenkreis. Eine Stabilisierung des Effektivwerts kann man hiervon nicht erwarten. Dazu wäre ein serielles Gerät erforderlich, das für die gesamte Last und nicht nur für die Verzerrungs-Blindleistung ausgelegt sein müsste – so wie etwa in einer Online-USV-Anlage.
Der Nachteil der elektronischen Netzreinigung liegt außer in hohen Kosten – Hersteller nennen einen Faktor von 3 bei kleinen und 2 bei großen Einheiten gegenüber passiven Filtern – in der hochfrequenten Taktung. Damit kommen die Risiken und Nebenwirkungen wieder zum Tragen, die der Technik der Pulsweiten-Modulation nun mal anhaften: Das leidige, nach wie vor ungelöste Problem der Schutzleiterströme aus den hier notwendig werdenden Entstörfiltern [13].
Während die Verlustleistung bzw. der Eigenverbrauch der elektronischen Filter – wie auch der passiven – gering ist und sich je nach Baugröße im Bereich von vielleicht 1 % der Nennleistung abspielt, stellt sich hier eine ganz andere Frage, nämlich:
Warum werden die zunehmend häufiger eingesetzten leistungselektronischen Frequenzumrichter heute immer noch bis zu einem recht hohen Leistungsbereich von mehreren 100 kW mit passiven Eingangsstufen ausgeführt und ein elektronischer Filter daneben gesetzt, statt eben genau diese Technik der Pulsweiten-Modulation von vornherein auch in der Eingangsstufe und nicht nur in der Ausgangsstufe des Umrichters einzubauen? Das ist mit geringfügiger Übertreibung so, als verkaufe man Autos ohne Bremsen, um Kosten zu sparen, und hänge dann einen gebremsten Anhänger daran, ohne den das Fahrzeug nicht fahren darf. Selbst dann, wenn der Fahrzeughalter nicht mit dem Nutzer identisch ist, was der üblichen Situation im Netz entspräche, käme es nicht dazu.



㊶ Dem typischen Eingangsstrom z. B. eines Frequenzumrichters…



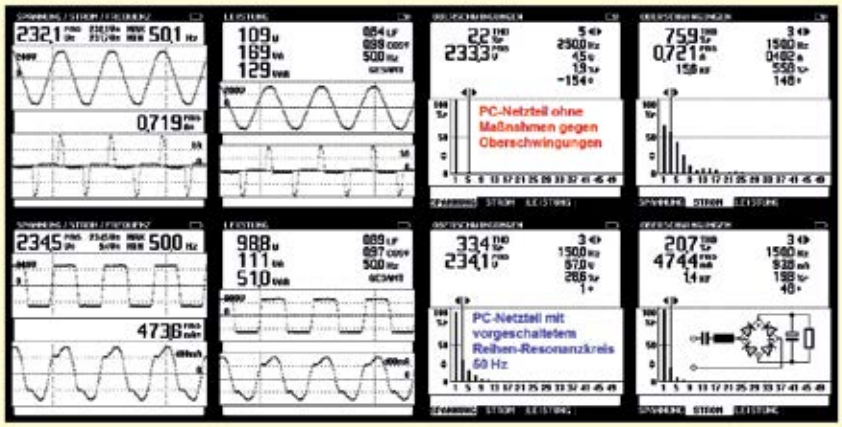
㊷ …wird ein 'synthetisch' erzeugter Ausgleichsstrom derart hinzu gefügt…



㊸ …dass die Summe wieder eine Sinusform ergibt

Quelle: S. Fassbinder/ep

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)



Quelle: S. Fassbinder/ep

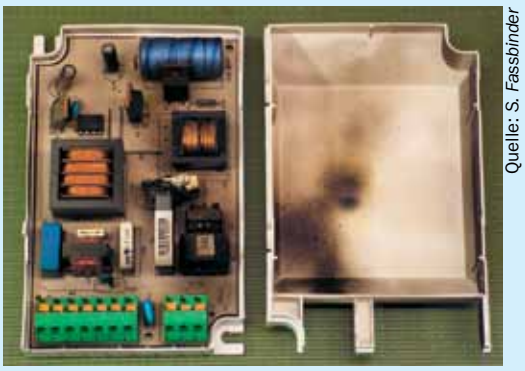
44 PC-Netzteil ohne irgendwelche Maßnahmen gegen Oberschwingungen und mit vorgeschaltetem 50-Hz-Saugkreis

Quelle: S. Fassbinder

45 LC-Saugkreis wie für die Versuche verwendet

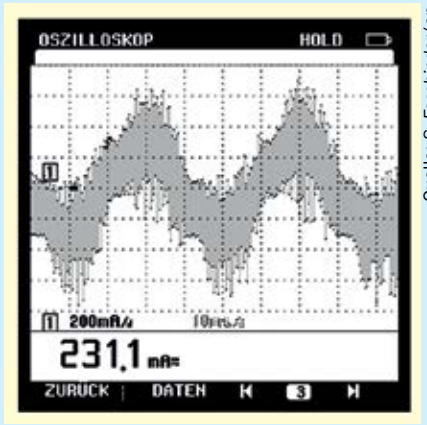
Quelle: S. Fassbinder

46 Die Hälfte dieser Lösung wird bisweilen in PC-Netzteilen eingesetzt



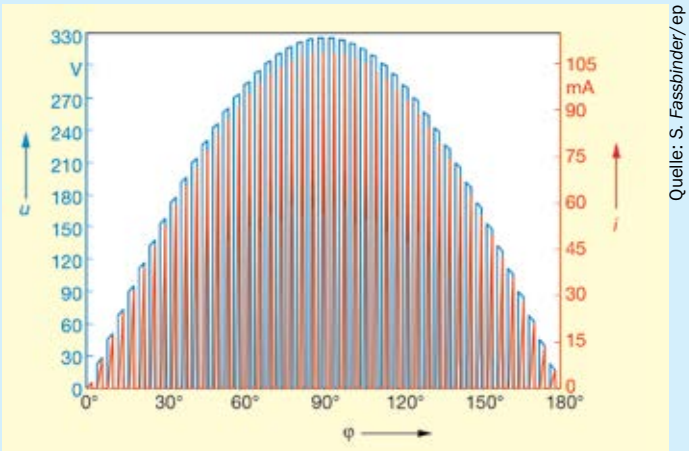
Quelle: S. Fassbinder

49 In jedem von 400 ausgefallenen Doppel-EVG 2x26 W das gleiche Schadensbild: nicht ein Halbleiter, sondern ein passives Bauteil, ein Kondensator, ist die Ursache



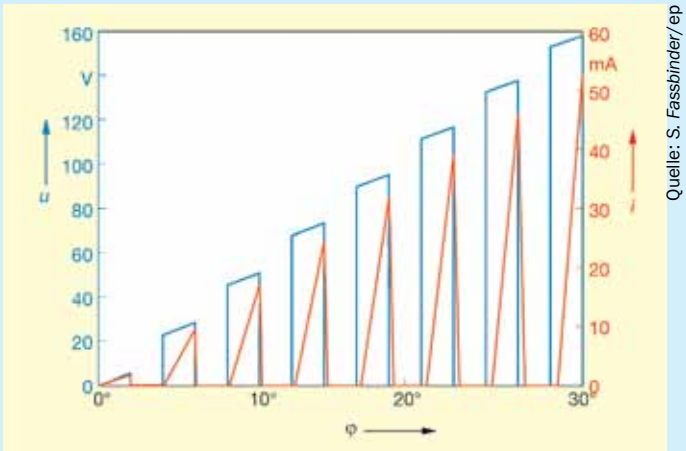
Quelle: S. Fassbinder/ep

50 Eingangsstrom eines der EVG aus Bild 49



Quelle: S. Fassbinder/ep

47 Hochfrequentes Ein- und Ausschalten der Netzspannung erzeugt einen Sägezahnstrom, der aus der Ferne betrachtet wieder sinusförmig aussieht



Quelle: S. Fassbinder/ep

48 Ausschnittvergrößerung von Bild 47

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

Der vernünftigste Ansatz dürfte auch hier darin bestehen, die Umrichter mit weit reichenden passiven Dämpfungsgliedern gegen Oberschwingungen zu bestücken und erforderlichenfalls weitere passive netzparallele Filter einzusetzen, bis der Pegel auf ein elektromagnetisch verträgliches Maß gefallen ist. Dabei muss erneut betont werden, dass ein starkes, ‚steifes', nach dem TN-S-System errichtetes Netz sehr hohe Strom-Oberschwingungspegel erträgt.

6.2 Auf der Geräteseite

Da aber die Netze sehr langlebige Güter und nur mit großem Aufwand zu ersetzen sind, hat dies wohl zu dem Ansatz geführt, das Problem von der Geräteseite her anzugehen, obwohl die Verteilung eines Problems auf viele kleine, dezentrale Lösungen stets kostenintensiver ist als eine große, zentrale Lösung. Zwar wurde schon ausgeführt, dass auch im Netz – bei Grundschwingungs- wie Verzerrungs-Blindleistung – der dezentrale Ansatz ein besseres Ergebnis bringt als der zentrale, doch damit war keine so feine Verteilung gemeint wie der Einsatz von Filtermaßnahmen in jedem kleinen Hausgerät ab z. B. 3 W Nennleistung.

6.2.1 Passive Methoden: Induktivitäten

Wie bei den Maßnahmen im Netz besteht auch bei jenen am einzelnen Gerät die Auswahl zwischen passiven und aktiven Lösungen. Ein sehr gutes Ergebnis (Bild 44) bringt z. B. ein Saugkreis – jetzt jedoch mit der verzerrenden Last in Reihe geschaltet, nicht parallel dazu, und auf die Grundfrequenz von 50 Hz, nicht auf irgendwelche Oberschwingungen abgestimmt. Dieser lässt die Netzfrequenz nahezu ungehindert in die Last fließen, hindert aber die Oberschwingungen sehr weit gehend an deren Austritt in Richtung Netz.

Dies geht natürlich wieder auf Kosten der Spannung, die nun stärker verzerrt ist als der Strom – jedoch nur hinter dem Filter, also an der betreffenden Last. Wenn diese das mit sich machen lässt, ist alles in Ordnung. Bei einem PC-Netzteil z. B. ist dies der Fall.

Allerdings wurde diese Idee nie kommerziell umgesetzt – schon wegen des erheblichen Volumens und Gewichts (Bild 45). Die Hälfte dieser Lösung findet man bisweilen in PC-Netzteilen in Form einer vor das Netzteil geschalteten Drossel – oder, gemessen an der üppigen Nennleistung eines solchen Netzteils, doch wohl eher eines Drösselchens (Bild 46). Eine größere Induktivität lässt sich schon allein aus Platzgründen nicht einsetzen und würde ohne den Kondensator selbst bei 50 Hz schon zu viel Impedanz in den Stromkreis einbringen und also die Versorgung gefährden. An diesem Punkt müsste der Kondensator hinzu kommen. Da es dem Hersteller aber um die Einhaltung von Normen und nicht um Vermeidung von Störungen geht, setzt er diese Maßnahme nur so mager um wie zur Erfüllung der großzügigen Grenzwerte der DIN EN 61000-3-2 notwendig [16]. Die tatsächliche Situation im Netz kennt er nicht, kann also nicht beurteilen, ob Filtermaßnahmen überhaupt erforderlich sind.

6.2.2 Aktive Methoden: Pulsweiten-Modulation (PWM)

Die gängige Methode der Reduktion von Oberschwingungsströmen aus Endgeräten besteht heute im Einsatz der elektronischen Leistungsfaktor-Korrektur (PFC: power factor correction). Dabei wird durch das Ein- und Ausschalten der Netzspannung mit wesentlich höherer als der Netzfrequenz die Sinuskurve des Stroms näherungsweise wieder hergestellt. So entsteht zunächst einmal ein Sägezahn-Verlauf (Bilder 47 und 48): Die Spannung wird auf eine HF-Drossel geschaltet, in der der Strom – je nach Augenblickswert der Spannung schneller oder langsamer – hochläuft. Nach dem Abschalten der Spannung fließt er über eine Freilaufdiode weiter und klingt – je nach Augenblickswert der Spannung schneller oder langsamer – wieder ab. Durch eine HF-Glättungskapazität, die so klein bemessen ist, dass sie von der soeben wieder hergestellten 50-Hz-Schwingung kaum etwas ‚aufschluckt', wird eine mehr oder weniger weit gehende Annäherung der Sinusform erreicht.

Die Trennung von NF und HF und damit die Glättung der Sinuskurve funktioniert natürlich umso besser, je weiter diese beiden Frequenzen auseinander liegen. Bei der NF, die zwangsläufig der Netzfrequenz entspricht, gibt es hier naturgemäß keinerlei Variationsbreite. Die besten Ergebnisse hat man z. B. bei EVG für Leuchtstofflampen im Bereich ab 20 kHz (oberhalb des hörbaren Bereichs, das ist Bedingung) bis etwa 60 kHz erzielt. Bei Schaltnetzteilen liegen die Verhältnisse ähnlich. Verluste entstehen nämlich in den Schaltelementen fast nur während des Übergangs vom leitenden in den sperrenden Zustand und zurück. Ist der Halbleiter gesperrt, ist der Strom gleich null. Ist der Halbleiter leitend, ist der Spannungsfall an ihm nahezu null, nur etwa 1 V fällt daran ab. Die Verlustleistung aus Spannungsfall mal Strom ist nur dann erheblich, wenn Spannung und Strom gleichzeitig vorhanden sind. Deswegen ist ein schnellstmöglicher Übergang vom leitenden in den sperrenden Zustand und umgekehrt vorteilhaft.

Der eckige – hier dreieckige – Verlauf des Stroms bedingt aber seinerseits theoretisch ein unendliches, praktisch ein annähernd unendliches Spektrum von Oberschwingungen. Damit können die Störungen den Megahertz-Bereich erreichen und anfangen, zur leitungsgebundenen auch noch abgestrahlte Störungen hinzu zu fügen. Der Entwickler findet sich daher in einer Zwickmühle wieder:

- Hohe Frequenz verbessert die Rekonstruktion der Sinuskurve …
  … und erhöht den Strom im „Sinusfilter".
- Hohe Flankensteilheit der Spannung vermindert Verluste …
  … und verbreitert das Störspektrum.

Man wird also, abhängig vom elektronischen Aufwand, den man treibt, die Harmonischen der Netzfrequenz nahezu vollständig los – Leistungsfaktoren von $\lambda = 0{,}98$ sind durchaus üblich – handelt sich aber unter Umständen dafür Störungen im HF-Bereich ein.

So sind etwa Fälle bekannt geworden, in denen EVG, in Massen eingesetzt, ‚am eigenen Dreck erstickten'. Ausgerechnet in einem Verwaltungsgebäude eines großen Stromversorgers waren von 1 100 EVG nach wenigen Monaten bereits 400 wieder ausgefallen. Jedes Mal war der Filterkondensator der Eingangsstufe ‚hochgegangen' (Bild 49). Messungen zeigten, dass die Netzströme der EVG sehr stark mit HF-Störungen überlagert waren, die vermutlich den Taktfrequenzen eben dieser EVG entsprachen (Bild 50), denn jeder Filterkondensator filtert nur unvollkommen und lässt einen Teil der HF-Ströme eben doch ‚ins Freie' gelangen. Wird das zu viel, dann drückt diese Störung sozusagen zurück und überlastet den Kondensator. Bergauf fließt halt nichts ab.

So ist bei den – wenn auch zum Teil recht wirksamen und dabei sehr viel Platz und Material sparenden – elektronischen Maßnahmen gegen Oberschwingungen immer an die möglichen Rückwirkungen zu denken. Dasselbe EVU installierte in einem anderen Neubau an einem anderen Ort auf Anraten eines Sachverständigen [15] ganz ‚altmodische' Leuchten mit Leuchtstofflampen 4x18 W mit VVG in der verlustarmen Tandemschaltung und darüber hinaus mit der noch altmodischeren Duo-Kompensation – nur mit auf moderne Verhältnisse reduzierten Kapazitäten.

Lediglich die äußerst langlebigen und die Lampen schonenden elektronischen Starter wurden eingesetzt [16].

Seither sind weder Ausfälle und Störungen noch Oberschwingungen dort jemals wieder ein Thema gewesen.

Literatur

[12] www.sv-otto.de
[13] *Stefan Fassbinder:* Entstörfilter – Verursacher von Schutzleiterströmen. Elektropraktiker, Berlin 64 (2010) 12, S. 1039 f.
[14] DIN EN 61000-3-2:2010-03 (VDE 0838-2): Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV); Teil 3-2: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter).
[15] www.elq.de
[16] www.technologieforumkupfer.de/anwendungen/e-energie/licht/vvg-evg/wirkungsweise-vvg/starter/e-start

Fortsetzung

Der nächste Teil behandelt die aktuelle Normensituation.

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

Analyse und Auswirkungen von Oberschwingungen

Teil 6: Die Normensituation

S. Fassbinder, Düsseldorf

So genannte Oberschwingungen oder auch Harmonische entstehen vorwiegend beim Betrieb elektronischer Betriebsmittel an Wechsel- und Drehstromnetzen. Sie stellen für diese Netze eine zusätzliche und neuartige Beanspruchung dar, für die sie folglich auch nicht ausgelegt waren, was schon für Überraschungen wie Korrosion z. B. am Fundamenterder oder an Wasserrohren sorgte. PC-Netzwerke blieben um mehrere Größenordnungen hinter den versprochenen „Gigabits“ zurück und stürzten ab. Manchmal wurden Neutralleiter heiß, in extremen Einzelfällen bis zum Brand, obwohl doch jede Elektrofachkraft weiß, dass sie einphasige Lasten nur zu gleichen Teilen auf die drei Außenleiter eines Drehstromnetzes verteilen muss, und schon ist der Neutralleiter stromlos. Eben das aber funktioniert heute nicht mehr unbedingt. Dieser Beitrag bietet daher Detailkenntnisse zu Ursachen, Zusammenhängen und Lösungsmöglichkeiten.

7 Wie Normen die Probleme nicht lösen

Seit langer Zeit schon wirbt eine Firma für den Einsatz ihrer Produkte, der größtenteils von keiner Norm gefordert wird, mit folgendem Vergleich: „Stellen Sie sich ein Auto vor, in dem alles enthalten ist, was die StVZO verlangt; mehr aber auch nicht…“ – ein solches Fahrzeug wäre billig (weder preiswert noch kostengünstig, aber billig), nur marktfähig wäre es nicht, denn kaum jemand würde es kaufen. Nicht einmal eine heizbare Heckscheibe wäre darin enthalten, Bremskraftverstärker und Servolenkung schon mal gar nicht. Airbags und ABS vorzuschreiben hat sich ebenfalls erübrigt – denn die Kunden wollten dies sowieso haben. Und beim Eigenheim bis hin zum größten Bürogebäude reicht das in den Normen vorgegebene Minimum? Das ist in der Tat befremdlich.

Also noch einmal – **Normen:**

- können nur den ‚Durchschnittsfall‘ abdecken und
- richten ihr Augenmerk in erster Linie auf die Sicherheit.

Aspekte wie Funktionalität, Komfort, Verfügbarkeit, Nutzerfreundlichkeit, Umweltschutz, Energie- und Kosteneffizienz finden gerade erst Einzug in den Betrachtungsbereich. Auch können besondere Anwendungen durchaus höhere Ansprüche stellen – oder aber, ganz im Gegenteil, durch ihre spezifischen Eigenschaften die allgemeinen Anforderungen der allgemein gültigen Normen außer Kraft setzen, weil sie diese schlicht und ergreifend überbieten oder erübrigen. Man kann sich nicht gleichzeitig darüber beklagen, dass die Normen

- immer umfangreicher und entsprechend unübersichtlich werden,
- der eigene, spezielle Spezialfall aber nicht abgedeckt ist.

Da Normung vom Staat weder gelenkt noch finanziert wird, muss sie ‚sehen, wo sie bleibt‘, ist also auf freiwillige Helfer bzw. solche angewiesen, die von ihren Firmen in die betreffenden Gremien entsandt werden. Dabei kommt es manchmal zu widersprüchlichen Forderungen, wenn sich in Grenzbereichen Normen verschiedener Sachgebiete mit demselben Gegenstand beschäftigen, oder sogar zu grotesken Forderungen. Weniger häufig als gemeinhin angenommen kann man von Lobbyismus derjenigen Firmen und Verbände reden, die die Arbeitszeit ihrer Mitarbeiter in die Normung investieren. Die Statuten der DKE verbieten solch eigennützige, kommerziell orientierte Einflussnahme. Natürlich kommt dies dennoch vor.

Letztlich bleibt zu berücksichtigen, dass „Kommerz“ und „Wirtschaft“ einen eher abwertenden und einen eher aufwertenden Ausdruck für dieselbe Sache darstellen. Die Grenze zwischen Wirtschaftsförderung und Verhinderung von Wirtschaftshemmnissen wie Kartellen zu treffen ist oftmals schwierig. In der Regel jedoch sitzen in den Arbeitskreisen ‚Vollblut-Techniker‘ beisammen, denen es um die Sache geht und die im Zweifelsfall sogar zugeben können, dass der Mitbewerber eine bessere Idee oder die bessere Lösung hat. Vor diesem Hintergrund sollen hier einige Normen betrachtet werden, die im Zusammenhang mit den zuvor behandelten Themen stehen.

Autor
Dipl.-Ing. *Stefan Fassbinder* ist Berater für elektrotechnische Anlagen beim Deutschen Kupferinstitut (DKI), Düsseldorf.

7.1 DIN VDE 0298-4

Da waren viele Fachleute froh, als im August 2003 die Kabel-Installationsnorm DIN VDE 0298-4 neu herausgegeben wurde [17], die für eine Vielzahl von Kabeln und Leitungen in einer Vielzahl von Anwendungsfällen (Verlegearten) Werte für die Strombelastbarkeit angibt – leider allerdings bis dato immer nur für 2 oder für 3 belastete Adern in einer Leitung.

7.1.1 Ausgabe August 2003

Doch die Ernüchterung folgte auf dem Fuß: Obwohl schon lange bekannt, war wieder der Umstand ignoriert worden, dass in der heutigen Umgebung mit Oberschwingungen auch 4 Adern gleichzeitig belastet sein können, da sich eine symmetrische Belastung der 3 Außenleiter nicht mehr unbedingt gegenseitig aufhebt und den Neutralleiter überflüssig macht, sondern unter Umständen das Gegenteil bewirkt.

7.1.2 Ausgabe Juni 2013

Erst mit der Ausgabe Juni 2013 erschien zeitgleich das Beiblatt 3 zum Teil 520 der DIN VDE 0100 [18], in dem beschrieben wird, wie vorzugehen ist, wenn mit erheblichem Auftreten von Oberschwingungen zu rechnen ist. Die Methode beruht auf einigen praktischen Beispielmessungen an heutigen Bürogeräten und wurde parallel in der Fachpresse ausführlich dargestellt. Dabei wurden auch die Ruhe- und Arbeitszyklen typischer Bürogeräte ermittelt sowie die Stromaufnahme und die damit verbundenen Oberschwingungsströme über die Zeit erfasst. So entstanden Richtwerte für eine typische Belastung. Hierauf wird in der VDE 0298 verwiesen – wenn auch nur im Text, aber leider nicht unter den normativen Verweisungen.

7.2 DIN EN 50174-2 (VDE 0800-174-2)

Diese Norm [19] stellt ein gutes Beispiel dafür dar, wie die Problematik der Oberschwingungen allmählich Eingang in das Normenwesen fand, die Anforderungen detaillierter, konkreter und schärfer wurden. Dieser Prozess ist naturgemäß schwerfällig, weil hier eben verschiedene Interessengruppen aufeinander treffen, von denen jede zunächst einmal fürchtet, von den verschärften Bedingungen benachteiligt zu werden – und das womöglich noch ohne sachlichen Grund? Das muss verhindert werden! Mit der Zeit setzt sich dann meist wieder der Sachverstand durch.

7.2.1 Ausgabe Februar 2000

So hieß es erstmalig in der Ausgabe vom Februar 2000: „Es muss berücksichtigt werden, dass ein PEN-Leiter keine geeignete Erdung zur Verfügung stellen kann. Es muss auch berücksichtigt werden, dass die IT- und TT-Spannungsversorgungssysteme mehr Ausgleichsmaßnahmen erfordern.“ Das war immerhin schon mal etwas. Weiter hieß es dann jedoch: „Es sollte im Gebäude keinen PEN-Leiter geben. Wann immer möglich, sollte das TN-S-System verwendet werden.“ Dabei stellt sich die Frage, ob ein Wort wie „sollte“ in einer Norm überhaupt verwendet werden sollte.

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

7.2.2 Ausgabe September 2011

In der gegenwärtigen Ausgabe lesen sich die entsprechenden Anforderungen schon viel deutlicher: „Hinsichtlich der EMV-Problematik darf ein PEN-Leiter, über den unsymmetrische Ströme sowie sich überlagernde harmonische Ströme und andere Störungen übertragen werden, nicht als geeignete Erdung angesehen werden. Zusätzlich müssen IT- und TT-Verteilungssysteme mehr Ausgleichsmaßnahmen, insbesondere bezüglich Überspannungen, aufweisen. Daher gilt: Das TN-S-System muss verwendet werden (siehe EN 50310). Ausnahmen bestehen aufgrund vorhandener Hochspannungs-Stromverteilungsanlagen, die als TT- oder IT-System ausgeführt sind, oder wo die Anwendung […] oder örtliche Bestimmungen einen hohen unterbrechungsfreien Versorgungsgrad erfordern."

7.3 VDE 0100-444

Nun fällt es den Vätern der Normenreihen EN 50174 und EN 50310 (Mütter leider immer noch Mangelware; vielleicht erklärt das manches) allerdings auch leicht, Forderungen nach einer TN-S-Stromversorgung aufzunehmen, denn diese europäischen Normen finden ihre deutschen Entsprechungen in der Reihe VDE 0800 „Informationstechnische Anlagen von Gebäuden". Die ‚Dünnströmer' haben also sehr wohl erkannt, dass viele ihrer Störungen vom ‚Dickstrom' stammen. Das heißt allerdings auch, dass jene den zusätzlichen Aufwand nicht selbst planen und bezahlen müssen. In der Normenreihe 0100, die der gemeine Starkstrom-Elektriker (hoffentlich) liest, hatten es solche Forderungen doch sehr schwer, Eingang zu finden [20]. Die Thematik wurde schon früh angesprochen, doch man merkte den Formulierungen lange Zeit an, dass sie sich zwischen der prinzipiellen Einsicht zur Notwendigkeit und der Angst vor zusätzlichem Aufwand ihren Weg hindurch winden mussten.

7.3.1 Ausgabe Oktober 1999

So las man etwa im Oktober 1999 erstmalig etwas zu dieser Thematik, was folgendermaßen formuliert war: „In Gebäuden, die in bedeutendem Umfang Betriebsmittel der Informationstechnik aufweisen oder von denen dies für die Zukunft zu erwarten ist [was schon damals im Effekt eigentlich „alle Gebäude" bedeutete], muss ab dem Gebäudeeintritt der Stromversorgung die Anwendung des TN-S-Systems, d.h. die Verlegung getrennter Schutzleiter PE und Neutralleiter N, in Betracht gezogen werden". Man hatte sich also tatsächlich zu einem „muss" durchgerungen! Der EMV-orientierte Leser freut sich schon – doch zu früh. Das dünne Ende des, ach, so dick begonnenen Satzes kam hinterher. Es genügte also, das TN-S-System in Betracht zu ziehen, zu beschließen, den Gedanken gleich wieder als überflüssig zu verwerfen, und damit war die Sache erledigt und die Norm erfüllt. War das nicht schön? Jawohl, das war nicht schön.

7.3.2 Ausgabe Oktober 2010

Doch schon 11 Jahre später war es geschafft! Gut, das sind 3 PC-Generationen, 4 Versionen von Windows; der Aufstieg des ISDN liegt dazwischen, das heute schon längst wieder von gestern und vom DSL überholt ist, aber immerhin: Nun wird das TN-S-System wenigstens für neue Gebäude gefordert – wenn auch wieder mit Gummi. Im Absatz 444.4.3.1 heißt es: „TN-C-Systeme dürfen in neu errichteten Gebäuden, die eine wesentliche Anzahl von informationstechnischen Betriebsmitteln enthalten oder wahrscheinlich enthalten werden, nicht verwendet werden. Es wird empfohlen, in bestehenden Gebäuden TN-C-Systeme nicht beizubehalten, wenn diese Gebäude eine wesentliche Anzahl von informationstechnischen Betriebsmitteln enthalten oder wahrscheinlich enthalten werden."
Wann die Anzahl informationstechnischer Betriebsmittel „wesentlich" ist, bleibt also eine Geschmacksfrage. Jedes Bürogebäude ist jedoch fraglos dazu zu zählen, da ohne das Netzwerk eine Büroarbeit heute gar nicht mehr möglich ist. Der Absatz 444.4.3.2 lautet dann: „Anlagen in neu zu errichtenden Gebäuden müssen von der Einspeisung an als TN-S-Systeme errichtet werden; siehe Bild 44.R3A. In bestehenden Gebäuden, die bedeutende informationstechnische Betriebsmittel enthalten oder wahrscheinlich enthalten werden und die aus einem öffentlichen Niederspannungsnetz versorgt werden, sollte ab dem Anfang der Installationsanlage ein TN-S-System errichtet werden."
Also noch einmal das gleiche; nun aber mit der unbedingten Forderung nach dem TN-S-System in neuen Anlagen. Vermutlich wurde hier während der Erstellung der Norm vergessen, den vorherigen Entwurf zu löschen – doch welches ist die jetzt gültige Forderung? Auch das ist nicht das erste und einzige Mal, dass sich derlei Irrtümer ereignen.

7.4 DIN EN 50310 (VDE 0800-2-310)

Dies ist die erste Norm [21], die es wagte, das TN-S-System obligatorisch vorzuschreiben – auch wenn es sich um eine jener mutigen Bestimmungen handelt, die damit Festlegungen für die Nachbar-Disziplin treffen.

7.4.1 Ausgabe September 2000

Im Absatz 6.3 hieß es dort: „Die Wechselstrom-Verteilungsanlage in einem Gebäude muss die Anforderungen eines TN-S-Systems erfüllen. Dies macht es erforderlich, dass im Gebäude kein PEN-Leiter vorhanden sein darf."
So kurz, so knapp und so klar geht es – auch in einer Norm. Oder vielleicht doch nicht?

7.4.2 Ausgabe Oktober 2006

Im Oktober 2006 war diese eindeutige Forderung nämlich wieder verschwunden! Deren Autoren stellten dies durch Zufall (auf der Suche nach Dopplungen, Widersprüchen, Überschneidungen mit anderen Normen und

Kompakt und kompetent!

Berücksichtigt alle aktuellen Normenänderungen!

- Erdungsanlagen und brandschutztechnische Forderungen
- Fachliche Voraussetzungen und Berechtigungen der Errichter
- Mess- und Schutztechnik
- Netzaufbau und Besonderheiten
- Betreiben von Netzen und Schaltanlagen u. v. m.

10 % Preisvorteil für ep-Abonnenten

Mittelspannungsanlagen,
2. Aufl., unverän. Nachdruck 2014, 39,80 €,
Bestell-Nr. 3-341-01595-7,
Autor: F. Schmidt, K. Hempel

Jetzt bestellen!

www.elektropraktiker.de/shop
oder Bestellschein hinten im Heft

ep shop

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

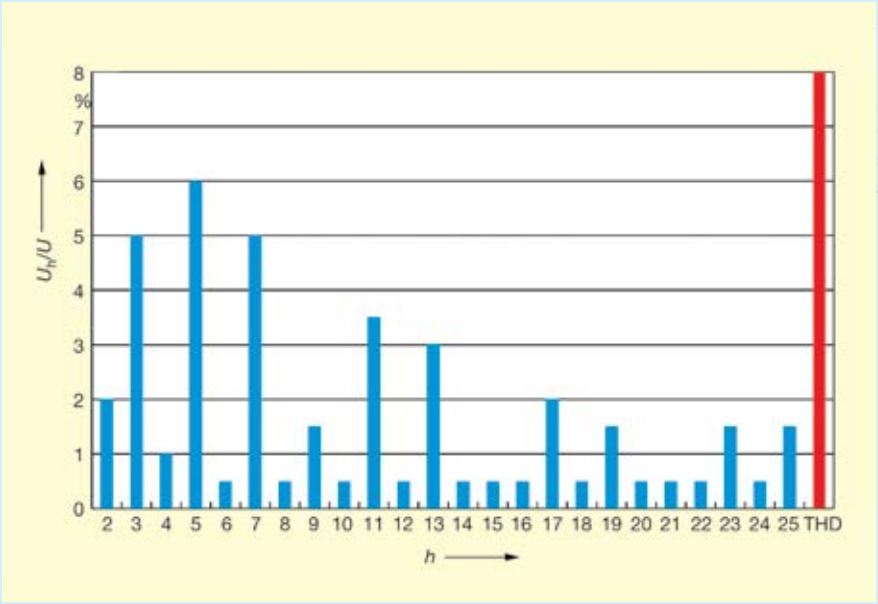
somit überflüssigen Passagen) fest. Nach den Tätern wurde gefahndet, die sich dann damit rechtfertigten, diese Forderung sei in der EN 50174 niedergelegt, und auf diese werde verwiesen. Dort jedoch findet man wieder einen Verweis auf die EN 50310 (siehe Abschnitt 7.2.2). Microsoft Excel hätte hier eine Zirkelbezugswarnung ausgegeben. Das VDE-Normenwerk auf DVD hat enorme Leistungsmerkmale, was die Verknüpfungen und z. B. die Suchfunktionen und anderes angeht, aber die Zirkelbezugswarnung, die fehlt noch…

7.4.3 Ausgabe Mai 2011

Das TN-S-System ist und bleibt hier nur eine – wenn auch dringende, wiederholte und auch begründete – Empfehlung. Allerdings sind in dieser ‚Dünnstrom-Norm' auch Gleichstrom-Versorgungsnetze für nachrichtentechnische Einrichtungen (einschließlich Fernspeisung) genormt. Darin entspricht das Gleichstromnetz nach dem DC-C-System dem TN-C-System beim Drehstrom und das DC-I-System dem TN-S-System in Wechsel- und Drehstromnetzen. Ein PEL- oder PEM-Leiter (Pluspol bzw. Mittelabgriff, falls vorhanden, geerdet) entspricht dem PEN-Leiter beim Drehstrom.

Tafel 7: Zulässige Oberschwingungspegel der Niederspannung nach DIN EN 50160:2011-02, Tabelle 1: Werte einzelner Oberschwingungsspannungen an der Übergabestelle bis zur 25. Ordnung

Ordnungs-Nr. *h*	Anteil		
	relativ	absolut	
1		230 V	400 V
2	2,0 %	4,60 V	8,00 V
3	5,0 %	11,50 V	20,00 V
4	1,0 %	2,30 V	4,00 V
5	6,0 %	13,80 V	24,00 V
6	0,5 %	1,15 V	2,00 V
7	5,0 %	11,50 V	20,00 V
8	0,5 %	1,15 V	2,00 V
9	1,5 %	3,45 V	6,00 V
10	0,5 %	1,15 V	2,00 V
11	3,5 %	8,05 V	14,00 V
12	0,5 %	1,15 V	2,00 V
13	3,0 %	6,90 V	12,00 V
14	0,5 %	1,15 V	2,00 V
15	0,5 %	1,15 V	2,00 V
16	0,5 %	1,15 V	2,00 V
17	2,0 %	4,60 V	8,00 V
18	0,5 %	1,15 V	2,00 V
19	1,5 %	3,45 V	6,00 V
20	0,5 %	1,15 V	2,00 V
21	0,5 %	1,15 V	2,00 V
22	0,5 %	1,15 V	2,00 V
23	1,5 %	3,45 V	6,00 V
24	0,5 %	1,15 V	2,00 V
25	1,5 %	3,45 V	6,00 V
THD	8,0 %	18,40 V	32,00 V



Quelle: S. Fassbinder/ep

51 **Grafische Darstellung der Werte aus Tafel 7**

Im Abschnitt 8.1.2 „Anforderungen" bleibt es dabei: „Die Gleichstromverteilung, falls vorhanden, muss über eng nebeneinander verlaufende und ein DC-I-System bildende Leiter L+ und L- geführt werden. Daher darf jeder Gleichstromrückleiter für eine informationstechnische Anlage nur einmal mit dem (L+)-Ausgang der Versorgungsanlage verbunden werden". Eigenartigerweise allerdings wird unmittelbar darüber im Abschnitt 8.1.1 „Allgemeines" gesagt: „Eine Gleichstromverteilungsanlage kann als DC-C oder DC-I ausgeführt werden (Tabelle 2)." In der Tabelle wird die Verwendung des DC-I-Systems empfohlen. Also was denn nun?

Die neuen Normen des ETSI (European Telecommunications Standardisation Institute) sind größtenteils gleich lautend mit den entsprechenden Abschnitten der EN 50310 und verlangen den konsequenten Einsatz des DC-I-Systems. Nur die Deutsche Telekom ließ sich einen Sonder-Passus genehmigen und erdet nach wie vor an beiden Enden, sowohl an der speisenden Seite als auch am Verbraucher, spart eventuell noch einen Leiter ein und schickt so viel Gleichstrom durch die Gebäudestrukturen, dass stellenweise die Stahlträger warm werden!

7.5 EN 50160

Dies bietet die optimale Überleitung zu einer der größten Unnormen unter dem Himmel. Anfangs war die Freude der Stromkunden groß, als die EVU-Leute sich im März 2000 endlich dazu hatten breit schlagen lassen, dass eine Norm verabschiedet wurde, die die Qualität elektrischer Energieversorgungen festlegt – oder was man mitunter „Festlegung" nennt. Bis zur gegenwärtigen Fassung vom Juli 2010 (deutsch Februar 2011) hat sich daran nicht viel geändert [22].

7.5.1 Großzügig: Spannungsschwankungen

Die EN 50160 gliedert sich in drei Hauptabschnitte:
4 Merkmale der Niederspannung,
5 Merkmale der Mittelspannung,
6 Merkmale der Hochspannung.
Hiervon ist jeder Abschnitt jeweils in 3 weitere Abschnitte aufgeteilt:
4.1 Allgemeines,
4.2 Andauernde Phänomene,
4.3 Spannungsereignisse.
Verblüffend ist in diesem Zusammenhang, dass „schnelle Spannungsänderungen" hier jeweils als Andauernde Phänomene und nicht als Ereignisse eingestuft sind. Weiter heißt es in Abschnitt 4.1: „Die genormte Nennspannung U_n für öffentliche Niederspannungsnetze beträgt U_n = 230 V entweder zwischen Außenleiter und Neutralleiter oder zwischen den Außenleitern:

- für Drehstromnetze mit vier Leitern: U_n = 230 V zwischen Außenleiter und Neutralleiter;
- für Drehstromnetze mit drei Leitern: U_n = 230 V zwischen den Außenleitern."

Das ist immerhin eine klare Aussage, auch wenn 5-Leiter-Netze offenbar nicht existieren. Darüber hinaus gibt es aber nur Stellungnahmen wie: „Unter normalen Betriebsbedingungen mit der Ausnahme von Intervallen mit Unterbrechungen sollten Änderungen der Versorgungsspannung ±10 % der Nennspannung U_n nicht überschreiten." Für besonders entlegene Kunden sollte die Spannung nicht mehr als 15 % einknicken. Wann ein Kunde entlegen ist, kann im Einzelfall auf nationaler Ebene festgelegt werden. Knickt sie noch tiefer ein, so sind die Betriebsbedingungen halt nicht normal. Fällt die Spannung ganz aus, erlischt offenbar urplötzlich auch die Verpflich-

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

tung, dass sie eigentlich vorhanden sein müsste, da bei Unterschreitung des Grenzwerts die Betriebsbedingungen nicht mehr normal sind, denn was „normal“ ist, steht nirgends.

7.5.2 Scheunentor: Oberschwingungen

Die zulässigen Oberschwingungspegel (Tafel ❼ und Bild ❺❶) sind so hoch gewählt, dass alles, was bisher dargebracht wurde, in dieses ‚Scheunentor‘, wie es ein Zyniker einst nannte, spielend hinein passt. Interessanterweise wird genau die gleiche Tabelle (Tafel ❼) im Abschnitt 5 der EN 50160 wiederholt, also gelten im Mittelspannungsnetz die gleichen großzügigen Werte wie in der Niederspannung. Nur in Hochspannungsnetzen liegen sie etwas niedriger. Auf allen Spannungsebenen müssen „unter normalen Betriebsbedingungen“ 95 % der 10-Minuten-Mittelwerte einer Woche diese „Grenzen“ einhalten. Dies bietet also links und rechts des Scheunentores gleich zwei Fluchttüren:

- Entweder man hat dummerweise wieder einmal die anderen 5 % erwischt,
- oder die Betriebsbedingungen waren halt nicht „normal“,

sollten die zulässigen Pegel überschritten worden sein. Da das jedoch immer noch ein wenig knapp ist, hat man ein drittes Schlupfloch in Form der Einschränkung eingesetzt:

- „Resonanzen können höhere Spannungen bei einer einzelnen Oberschwingung hervorrufen“.

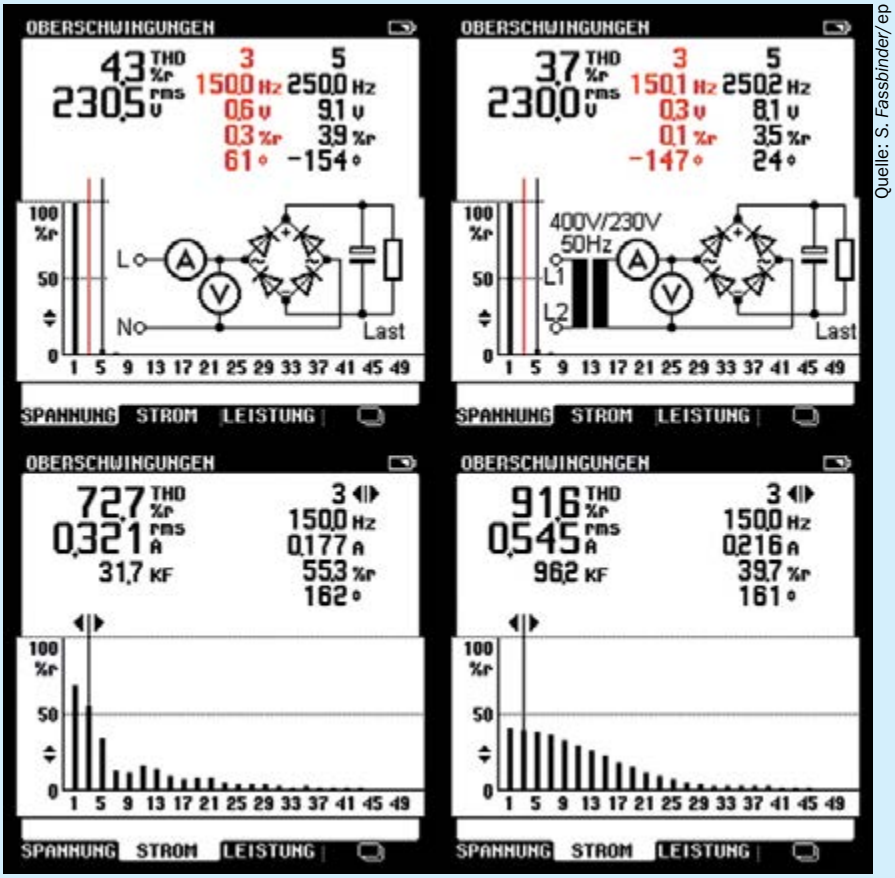
Eine Obergrenze wird nicht genannt. Von etwaigen Konsequenzen steht dort auch nichts. Also ist das Auftreten einer einzelnen Oberschwingung – in beliebiger Höhe und unabhängig davon, um welche es sich handelt – „unter normalen Betriebsbedingungen“ zunächst einmal als unschädlich anzusehen? Ein Mal ist kein Mal? Der erste Diebstahl bleibt straffrei – egal, wie viele Millionen erbeutet wurden? ‚Die Anlage ist normgemäß abgebrannt!‘ formuliert der Zyniker wieder [20]. Eine Einschränkung besteht möglicherweise implizit durch die Begrenzung des THD*U* auf 8 % (Bild ❺❶/Tafel ❼), wodurch natürlich auch keine Oberschwingung für sich allein einen Wert über 8 % annehmen dürfte. Explizit ausgeführt ist dort aber nicht, ob dies so zu verstehen ist oder die Ausnahme dann auch für den THD*U* gilt.

7.5.3 Grotesk: Abweichungen der Frequenz

Die Augen reiben muss man sich aber insbesondere in Anbetracht der zulässigen Abweichungen der Netzfrequenz von deren Nennwert: Der Wert muss – natürlich wiederum nur ‚unter normalen Betriebsbedingungen‘ – bei synchroner Verbindung mit einem Verbundnetz

- während 99,5 % eines Jahres eine Toleranz von ±1 % einhalten,

also zwischen 49,5 Hz und 50,5 Hz liegen, und



Quelle: S. Fassbinder/ep

❺❷ **Die Beschaffenheit der zur Prüfung verwendeten Spannung hat sehr starken Einfluss auf das Ergebnis**

- während 100 % eines Jahres eine Toleranz von +4 % und –6 % einhalten,

also zwischen 47 Hz und 52 Hz liegen.

Das ist gerade so, als wolle man einen Autofahrer, der von einer hohen Autobahnbrücke gestürzt ist, posthum auch noch dafür belangen, dass er im freien Fall die höchstzulässige Geschwindigkeit überschritten hat. Es gibt nämlich in der Technik kaum etwas Genaueres – außer vielleicht in Astronomie und Raumfahrt – als die Frequenz im europäischen Verbundnetz. Wenn dessen Frequenz auf 49,8 Hz absackt oder auf 50,2 Hz ansteigt, herrscht bereits in allen Leitzentralen schreiende Panik und akuter Katastrophenalarm.

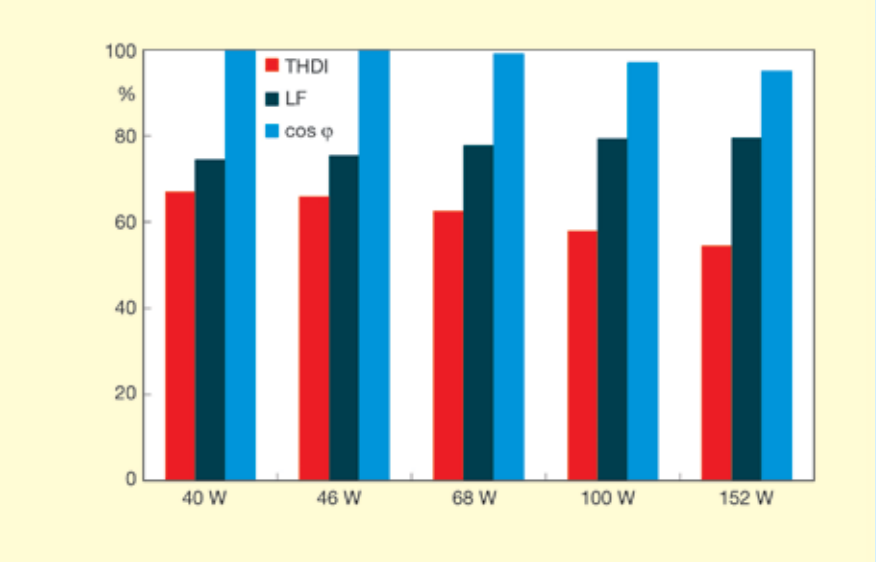
Man denke nur an das heute viel zitierte „50,2-Hz-Problem“, das besagt, dass sich bei dieser Frequenz sämtliche Solar-Wechselrichter abschalten müssen – alle auf einmal, was bei der heutigen Einspeiseleistung für den Netzbetrieb gerade so gefährlich ist wie tatenloses Zusehen.

Deswegen geht man zur Zeit von diesem abrupten Abschalten zu einer Rampen-Lösung über. Sollte diese jemals zum Tragen kommen, kann also von „normalen Betriebsbedingungen“ schon lange keine Rede mehr sein, denn dazu kommt es nur in den extremsten Ausnahmesituationen, um das Allerschlimmste zu verhindern – wohlgemerkt: Bei 50,2 Hz; nicht etwa erst bei 52 Hz! In Grenzsituationen ist also die EN 50160 das erste, was sich selbst ‚abschaltet‘. Erst danach sind die Solar-Wechselrichter an der Reihe.

7.6 DIN IEC 61000-3-2 (VDE 0838)

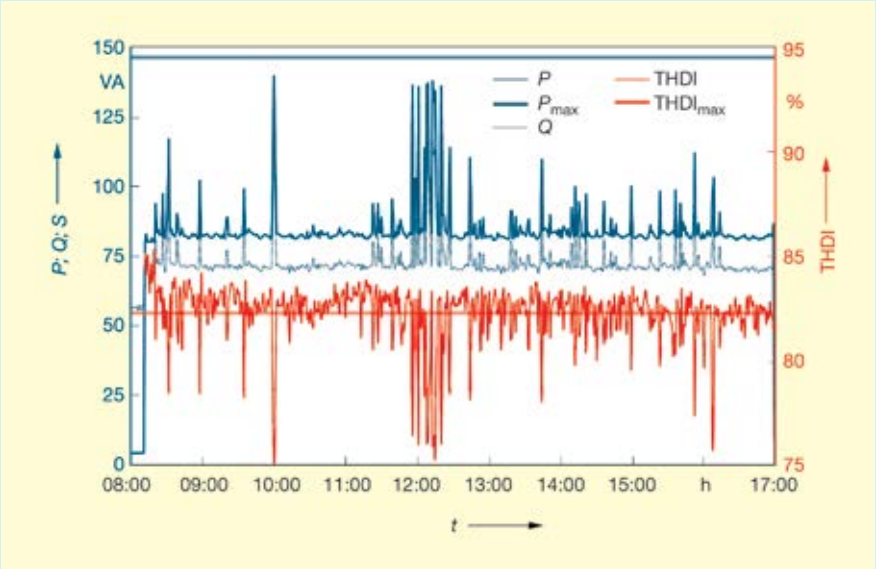
Ein anderer Ansatz versucht, das Problem an der Quelle zu lösen, also bei den einzelnen Geräten, die Oberschwingungen verursachen – ein an sich sehr richtiger Ansatz [23]. In diesem Fall jedoch ist das, gesamtwirtschaftlich betrachtet, der ungünstigere Weg, denn die Aufteilung in viele kleine Einheiten, also hier die Verteilung eines Problems auf die Wiederholung vieler kleiner Insellösungen, ist stets mit mehr Aufwand an Material und Arbeit verbunden als eine zentrale Lösung. Als Beispiel sei noch einmal auf unser Stromnetz verwiesen, das traditionell mit riesigen Kraftwerksblöcken von über 1 GW Leistung aufgebaut ist. Dies geschieht nicht aus irgendwelchem Lobbyismus und schon gar nicht, um gewissen politischen Strömungen ein Thema zu liefern, sondern ganz einfach, weil es trotz der erforderlich werdenden langen Übertragungswege bei der Errichtung Kosten und Rohstoffe einspart und im Betrieb geringere Verluste aufweist als die dezentrale Erzeugung. Analog wäre auch die zentrale ‚Entsorgung‘ der Oberschwingungen ökonomisch und ökologisch sinnvoller gewesen. Nichtsdesto-

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)



Quellen: S. Fassbinder/ep

63 Mit zunehmender Belastung eines PC-Netzteils nimmt am Eingang der Leistungsfaktor (LF) zu, der THDI ab (der Grundschwingungs-Leistungsfaktor cosφ nimmt eher ab, was auf eine Drossel gemäß Bild 46, Abschnitt 6.2.1 hinweist)



64 Ein Arbeitsalltag eines Büro-PC: Die Leistungsaufnahme (als Bemessungsbasis der Grenzwerte) schwankt stark, der relative Wert des THDI sinkt, wenn die Leistungsaufnahme (durch hohe Beanspruchung des Prozessors) steigt

weniger trat die DIN IEC 61000-3-2 im Oktober 1998 in Kraft. Die gegenwärtige deutsche Fassung stammt von März 2010.

7.6.1 Eng: Die Anforderungen an die Prüfbedingungen

Die zur Prüfung zu verwendende Spannung muss recht enge Kriterien erfüllen. Das ist auch notwendig, denn wie schon zuvor gezeigt wurde, kann eine kleine Verzerrung der Spannung unter Umständen schon eine große Verzerrung des Stroms verursachen, und hier geht es darum, die Oberschwingungsströme der einzelnen Last zu begrenzen. Die zur Messung der Prüflinge verwendete Spannung muss also folgende Grenzen einhalten:

- 2,0 % Abweichung vom Nennwert,
- 0,9 % Gehalt Oberschwingung 3. Ordnung,
- 0,4 % Gehalt Oberschwingung 5. Ordnung,
- 0,3 % Gehalt Oberschwingung 7. Ordnung,
- 0,2 % Gehalt Oberschwingung 9. Ordnung,
- 0,2 % Gehalt Oberschwingungen geradzahliger Ordnung,
- 0,1 % Gehalt Oberschwingungen 11. bis 40. Ordnung.

Und diese Werte müssen während der Prüfung, also unter Last, eingehalten werden. Durch diese zusätzliche Forderung wird implizit sichergestellt, dass die innere Impedanz der speisenden Quelle einen bestimmten Höchstwert nicht überschreitet, was explizit nicht gefordert wird, aber eigentlich erforderlich wäre. Diese engen Anforderungen an die Prüfspannung haben ihren guten Grund. Man denke nur an den Ringkern-Transformator (Abschnitt 3.5), der auf Grund einer ‚Harmonischen nullter Ordnung' (Gleichspannung) in Höhe von nur 1,6 V, also weit unter 1 % der Grundschwingung, einen Strom der ‚nullten Harmonischen' (Gleichstrom) in Höhe des 100-fachen Leerlaufstroms des Transformators verursachte!

Weiterhin traten die zweite Harmonische in Höhe des 40-fachen Leerlaufstroms auf, die vierte und die sechste nicht viel weniger und so fort – obwohl auch diese in der speisenden Spannung nur zu Größenordnungen um 1 % enthalten waren. Man bedenke, dass diese ‚Harmonischen' im Magnetisierungsstrom eines Transformators normalerweise überhaupt nicht vorkommen (sollten).

Ein anderer, in Abschnitt 4.2 aus Platzgründen nicht näher beschriebener Versuch hatte gezeigt, dass eine mit einem THD von 4,3 % vorbelastete Netzspannung an einem älteren Laptop-Netzteil (45 W; ohne irgendwelche eingebauten Maßnahmen gegen Oberschwingungen) zu einem THD*I* = 72,7 % geführt hatte. Gleichsam durch Umpolen der Oberschwingungen, insbesondere der hier dominierenden fünften, ließ sich der Wert auf THD*I* = 91,6 % steigern! Die Quasi-Umpolung wurde ganz einfach erreicht, indem dieselbe Prüflast nicht mehr zwischen L und N, sondern nun über einen Steuertransformator 400 V/230 V zwischen zwei Außenleitern betrieben wurde. Obwohl hierdurch der Wert des THD*U* von 4,3 % auf 3,7 % fiel, stieg der THD*I* krass an (Bild 62)! Dies zeigt, wie wichtig die Einhaltung der Sinusform der zu verwendenden Spannung ist, will man Geräte nach IEC 61000-3-2 prüfen.

Dennoch hat man vergessen, auch eine sehr niedrige Grenze für Gleichspannungs-Anteile in der Prüfspannung mit aufzunehmen. Noch besser wäre die Forderung gewesen, grundsätzlich einen Trenntransformator einzusetzen. Dieser hätte mit absoluter Sicherheit jeden Rest von Gleichspannung heraus gefiltert. Ein Transformator kann zwar ausgangsseitig mit einem welligen Gleichstrom belastet werden, was zu einem Gleichspannungs-Anteil an den Ausgangsklemmen führt, aber niemals eine Gleichspannung von der Primär- auf die Sekundärseite übertragen. Allerdings bringt er zusätzliche Impedanz in den Speisekreis ein und müsste deswegen entsprechend ausgelegt und stark überdimensioniert werden (der oben verwendete war dank Ringkern-Bauform extrem arm an Streufeld

In unserem Online-Facharchiv unter www.elektropraktiker.de finden Sie weitere 377 Beiträge zum Thema EMV

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

und 2 kVA stark, also für jenen Versuch 40-fach überdimensioniert), doch diesen Aufwand hat man gescheut.

7.6.2 Großzügig: Die Anforderungen an die Geräte

Wozu denn auch noch strengere Anforderungen an die Prüfeinrichtungen, wenn die Bedingungen, die die damit geprüften Prüflinge erfüllen müssen, dann wieder einem Scheunentor gleichen? Die Oberschwingungs-Emission wird in der IEC 61000-3-2 relativ zur Nennleistung des Gerätes begrenzt, was eigentlich einen sinnvollen Ansatz darstellt. Besser hätte man die Scheinleistung statt der Wirkleistung gewählt, doch sei es drum. Die Geräte werden nach IEC 61000-3-2 in vier Klassen eingeteilt. Betrachten wir beispielsweise die Klasse D: Personalcomputer und Bildschirme (Monitore) für Personalcomputer; Fernseh-Rundfunkempfänger mit einer Nenn-Leistungsaufnahme von 75 W bis 600 W: Ein Computer mit sage und schreibe THD*I* = 68,8 % kann unter Umständen die Prüfung noch bestehen! Falls in dem Eingangsstrom auch geradzahlige Oberschwingungen gefunden werden, was normalerweise nicht der Fall ist, können es sogar 72,8 % sein, ohne dass der Prüfling zwangsläufig durch die Prüfung fällt – in der Lesart THD*R*. In der auch in Normen üblichen Lesart THD*F* sind es sogar 94,8 % bzw. 106,2 %, die noch konform sein können!

Nun wurde vor Zeiten an einem PC-Arbeitsplatz mit einem alten Pentium 166 Computer, der noch vor Inkrafttreten der IEC 61000-3-2 und somit ohne jede Minderungs-Maßnahme gebaut wurde, eine Eingangsleistung von 116 W gemessen. Bei dieser Klasse von Geräten darf beispielsweise die dritte Strom-Oberschwingung 3,4 mA/W Leistungsaufnahme des Prüflings betragen – was eine recht moderate Hürde darstellt, denn damit hätte die dritte Oberschwingung nach Norm bis zu 395 mA betragen dürfen. Gemessen wurden 411 mA. Um dieser nicht gerade dramatischen Grenzwert-Überschreitung Herr zu werden und den alten Rechner an die damals neu eingeführte Norm anzupassen, hätten sich, so dies denn gefordert worden wäre, gleich fünf verschiedene Methoden angeboten, von denen keine eine wirkliche technische Änderung an dem Gerät erfordert hätte:

Methode 1: Entweder man betrachtet den Arbeitsplatz nicht als Ganzes, sondern als einzelne Geräte – was den Tatsachen entspricht. Dann ergibt sich, dass der Monitor etwa 60 W aufnimmt, der Rechner selbst nur etwa 40 W, und der Rest geht in einige Peripherie-Geräte. Die Norm gilt aber nur für Geräte ab 75 W – und kommt also gar nicht zur Anwendung. Diese Methode scheitert allerdings bei einem heutigen Computer, denn dessen Leistungsaufnahme ist höher als 75 W – also weiter zur

Methode 2: Man gibt die Nennleistung 4 % höher als die tatsächlich gemessene Leistung an. 10 % mehr sind erlaubt (Abschnitt 9.1, Beispielsatz 6.2.2). Damit wäre die Sache im vorstehenden Beispiel schon erledigt. Alternativ hilft

Methode 3: Man erhöht die Leistungsaufnahme des PC („Glühbirne mit reinhauen“, wie ein weiterer Zyniker es einst formulierte). Durch Parallelschaltung einer ohmschen zu der verzerrenden Last und Integration in das Gerät erhöht sich die Nennleistung als Maß für den Oberschwingungspegel, nicht aber die absolute Höhe der Oberschwingungsströme. Ähnlich arbeitet

Methode 4: Man kann auch einen ohmschen Widerstand mit der Last in Reihe schalten. Dadurch wird gleichsam das Netz künstlich verschlechtert. Wie früher erläutert, vermindert sich die Oberschwingungs-Emission der einzelnen Last, wenn sich die innere Impedanz des versorgenden Netzes erhöht. Durch diese Art der Verminderung des THD*I* erhöht sich zwar der THD*U*, doch dieser ist nicht Gegenstand der IEC 61000-3-2 – die ist erfüllt. Außerdem tritt diese Maßnahme, wenn integriert, nach außen nicht zu Tage. Der THD*I* erhöht sich nur innerhalb des Gerätes, und wenn dieses damit fertig wird – sei’s drum. Praktisch angewandt wird aber nur

Methode 5: Zur Ermittlung der einzuhaltenden Grenzwerte – in Milliampere pro Watt – muss der Mittelwert einer bestimmten Oberschwingung in einem bestimmten Zeitfenster durch den Höchstwert der in diesem Zeitfenster vorgekommenen Wirkleistungsaufnahme des Prüflings geteilt werden. Dies eröffnet bei der Messung eines Computers gleich zwei Erweiterungen des zulässigen Bereichs, denn:

- Erstens weist ein PC-Netzteil bei voller Last einen niedrigeren relativen Oberschwingungs-Gehalt [%] auf als im Teillast-Betrieb (Bild 53), auch wenn die absoluten Oberschwingungsströme [mA] natürlich höher sind.
- Zweitens strengt sich ein Computer eben gerade bei der Büroarbeit nur sporadisch wirklich an. Lediglich für jeweils sehr kurze Zeitabschnitte steigt die Leistung über die Grundlast von – in dieser Beispiel-Messung – etwa 80 W. In diesen Abschnitten ist der relative THDI deutlich geringer (Bild 54): 80 W betrug die minimale Leistungsaufnahme (nach Beginn des Arbeitstages, d. h. nach dem Einschalten). Das Mittel lag mit 85 W ganz dicht daran, der Spitzenwert dagegen mit 146 W weit darüber (Sekundenwert – die Werte ändern sich so schnell, dass im Diagramm nur Minuten-Mittelwerte dargestellt werden konnten, da ansonsten nur eine farbig verschmierte Fläche zu sehen gewesen wäre).

Abschließend ist zur Klasse D noch anzumerken, dass die Grenzwerte der Oberschwingungsströme zwar proportional zur Leistungsaufnahme, jedoch gedeckelt sind. Mit 3,4 mA/W z. B. für die dritte Oberschwingung errechnet sich für die Obergrenze des Gültigkeitsbereichs mit 600 W ein Höchstwert von 2,04 A. „Höchstens aber“, heißt es weiter, dürfe der Wert „2,3 A betragen“. Wie es zu diesem Deckel kommt, der ein paar Zentimeter über dem Topf schwebt, ist unklar. Bei der siebten, neunten und elften Harmonischen beobachtet man ähnliche Flugversuche. Bei der fünften sind die Werte genau gleich (1,9 mA/W x 600 W = 1,14 A; „höchstens aber 1,14 A“). Wahrscheinlich handelt es sich wieder um einen der Hektik geschuldeten redaktionellen Fehler. Normen in Hektik zu erstellen hat sich noch nie bewährt.

Literatur

[17] Aktuelle Ausgabe: DIN VDE 0298-4:2013-06: Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen – Teil 4: Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in und an Gebäuden und von flexiblen Leitungen.

[18] Aktuelle Ausgabe: DIN VDE 0100-520:2013-06: Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 5-52: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Kabel- und Leitungsanlagen; (IEC 60364-5-52:2009, modifiziert + Corrigendum Feb. 2011); Deutsche Übernahme HD 60364-5-52:2011.

[19] Aktuelle Ausgabe: DIN EN 50174-2:2011-09; VDE 0800-174-2:2011-09: Informationstechnik – Installation von Kommunikationsverkabelung – Teil 2: Installationsplanung und Installationspraktiken in Gebäuden; Deutsche Fassung EN 50174-2:2009 + A1:2011 + AC:2011.

[20] DIN VDE 0100-444:2010-10: Errichten von Niederspannungsanlagen – Teil 4-444: Schutzmaßnahmen – Schutz bei Störspannungen und elektromagnetischen Störgrößen (IEC 60364-4-44:2007 (Abschnitt 444), modifiziert); Deutsche Übernahme HD 60364-4-444:2010 + Cor.:2010.

[21] Aktuelle Ausgabe: DIN EN 50310:2011-05; VDE 0800-2-310:2011-05: Anwendung von Maßnahmen für Erdung und Potentialausgleich in Gebäuden mit Einrichtungen der Informationstechnik; Deutsche Fassung EN 50310:2010.

[22] Aktuelle Ausgabe: DIN EN 50160:2011-02: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; Deutsche Fassung EN 50160:2010 + Cor. :2010.

[23] Aktuelle Ausgabe: DIN EN 61000-3-2:2010-03; VDE 0838-2:2010-03: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 3-2: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter) (IEC 61000-3-2:2005 + A1:2008 + A2:2009); Deutsche Fassung EN 61000-3-2:2006 + A1:2009 + A2:2009.

Fortsetzung

Die Schlussbetrachtung erfolgt in der nächsten Ausgabe

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

Analyse und Auswirkungen von Oberschwingungen

Teil 7: Schlussbetrachtung

S. Fassbinder, Düsseldorf

So genannte Oberschwingungen oder auch Harmonische entstehen vorwiegend beim Betrieb elektronischer Betriebsmittel an Wechsel- und Drehstromnetzen. Sie stellen für diese Netze eine zusätzliche und neuartige Beanspruchung dar, für die sie folglich auch nicht ausgelegt waren, was schon für Überraschungen wie Korrosion z. B. am Fundamenterder oder an Wasserrohren sorgte. PC-Netzwerke blieben um mehrere Größenordnungen hinter den versprochenen „Gigabits“ zurück und stürzten ab. Manchmal wurden Neutralleiter heiß, in extremen Einzelfällen bis zum Brand, obwohl doch jede Elektrofachkraft weiß, dass sie einphasige Lasten nur zu gleichen Teilen auf die drei Außenleiter eines Drehstromnetzes verteilen muss, und schon ist der Neutralleiter stromlos. Eben das aber funktioniert heute nicht mehr unbedingt. Dieser Beitrag bietet daher Detailkenntnisse zu Ursachen, Zusammenhängen und Lösungsmöglichkeiten.

8 Trends und Tendenzen

Normen sind also zum Lösen technischer Probleme nicht immer geeignet, wie im vorigen Teil dargelegt worden ist. Manchmal hat man den Eindruck, in den Normen stecke mehr Politik als Technik. Ein Heer von Technikern bemüht sich, die Normen nach den physikalischen Gegebenheiten auszurichten, aktuell zu halten und nach Möglichkeit etwas verständlicher zu gestalten, jedoch die Antwort auf die Frage, wie man mit Normen sachgerecht umgeht, lautet in einigen Fällen weiterhin: indem man sie umgeht.

Manche Normen scheinen geradezu darauf hin geschneidert zu sein, dass man dazu nicht einmal einen Bogen gehen muss. Um solche Normen ging es im voran gegangenen Abschnitt 7. So bedarf es gar nicht mehr der Erwähnung, dass die hier zuletzt besprochene Norm DIN EN 61000-3-2 (VDE 0838-2) in ihrer Klasse C „Beleuchtungseinrichtungen einschließlich Beleuchtungsreglern“ im Bereich über 25 W zwar brauchbare Grenzwerte vorhält, jedoch gleich gefolgt von dem Zusatz: „Ausgenommen Dimmer für Glühlampen mit einer Nennleistung bis 1000 W“. Wo gibt es schon Glühlampendimmer für über 1000 W Anschlussleistung? Aber da es bald kaum noch Glühlampen geben wird, ist dieses Thema von gestern und nur noch als abschreckendes Beispiel geeignet. Weiter leisten zum Teil auch die Fortschritte bei der Energie-Effizienz Schützenhilfe zum Unterlaufen normativer Forderungen. So liegen die heutigen PC-Flachbildschirme deutlich unter der Grenze von 75 W; bei den alten Röhrenmonitoren war dies schon eher grenzwertig.

Autor
Dipl.-Ing. *Stefan Fassbinder* ist Berater für elektrotechnische Anlagen beim Deutschen Kupferinstitut (DKI), Düsseldorf.

Aber wie schon ausgeführt sollte ein Niederspannungsnetz heute zum Umgang mit Harmonischen geeignet aufgebaut sein. Was das bedeutet, lässt sich ganz kurz und knapp in zwei Forderungen zusammenfassen:

- Nur noch ‚echte‘ TN-S-Systeme einsetzen, die diesen Namen auch verdienen – also mit ZEP (Zentraler Erdungs-Punkt, Bild 55)!
- Impedanzen niedrig halten, Leiterquerschnitte großzügig bemessen! Wo dies – hinsichtlich der induktiven Spannungsfälle – nicht ausreicht, gezielt einige passive Filter einsetzen.

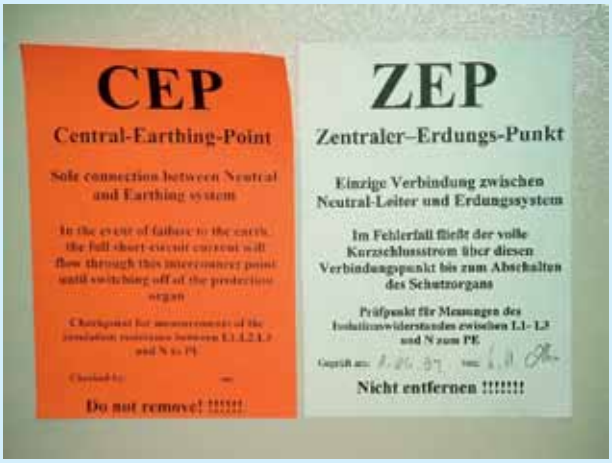
8.1 Gestern

Doch die Praxis ist dort leider noch nicht durchgängig angekommen. Ein Gutachter [24] tituliert in seinen sehr beliebten Lehrveranstaltungen die derzeitige Praxis gerne als „die verPENnte Elektrotechnik“ und betont: „Unsere Aufgabe ist es nicht, Normen zu erfüllen, sondern Störungen zu beseitigen und Schäden zu verhüten!“ Gern – und sehr treffend – vergleicht er den Stromkreis mit dem Wasserkreislauf. Ist in der Sanitärtechnik die Sickergrube längst überholt, so wird Entsprechendes in der Elektro-Installation noch regelmäßig vorgefunden und teilweise sogar in Neubauten installiert: Der Strom wird ordentlich über einen oder mehrere Außenleiter zur ‚Zapfstelle‘ hingeführt, findet aber keinen definierten Rückweg vor. Statt dessen lässt man die Rückströme gleichsam im Gebäude ‚versickern‘, und die Elektronik bekommt nasse Füße. Es erfordert wenig Zynismus, eher reinen Realismus, um diese Technik als „elektrische Kloake“ zu bezeichnen, mit der nicht morgen, sondern gestern Schluss gemacht werden muss. Die Normen sind auf dem besten Wege dorthin, doch der Normungsprozess ist unvermeidbar sehr langwierig. Hier ist zuerst die Sachkompetenz der entscheidenden Elektrofachkraft gefragt.

Diese Ausführungen sind mithin nicht als Argument gegen die Segnungen moderner

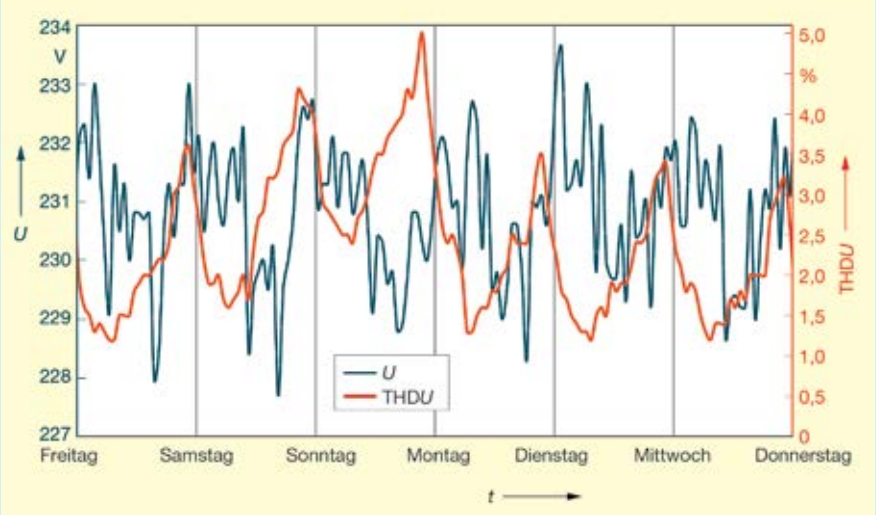
55 So kann ein ZEP aussehen …

Quellen: S. Fassbinder

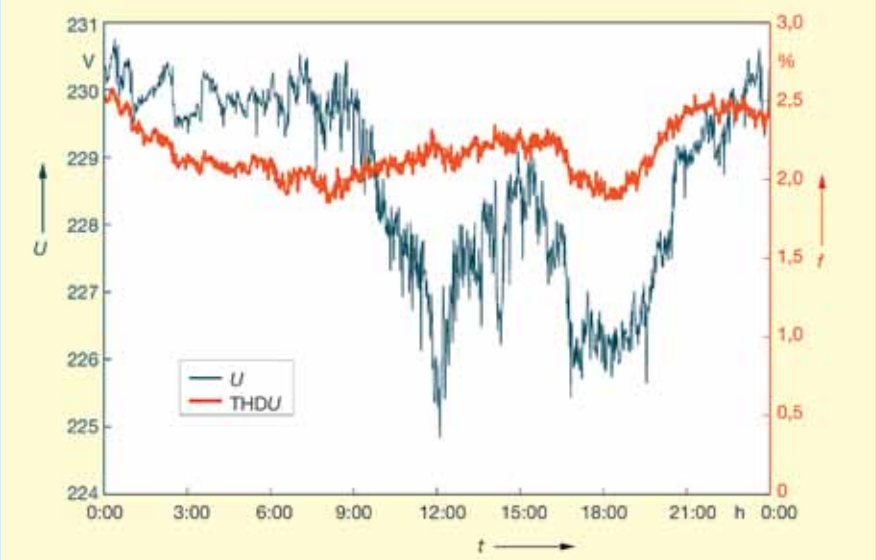


… und zweckmäßigerweise bringt man Hinweise darauf an, dass dieses eine Teil in der gesamten Anlage bitte nicht redundant ausgeführt werden möge

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)



56 Oberschwingungsgehalt an einer Haussteckdose in einem Wohngebiet vom 22. bis 28. August 2002 – interessehalber wurde die Spannung mit dargestellt



57 Oberschwingungsgehalt an derselben Stelle über einen Tag am 26. Dezember 2013 (Feiertag – vergleichbar mit Sonntag in Bild 56)

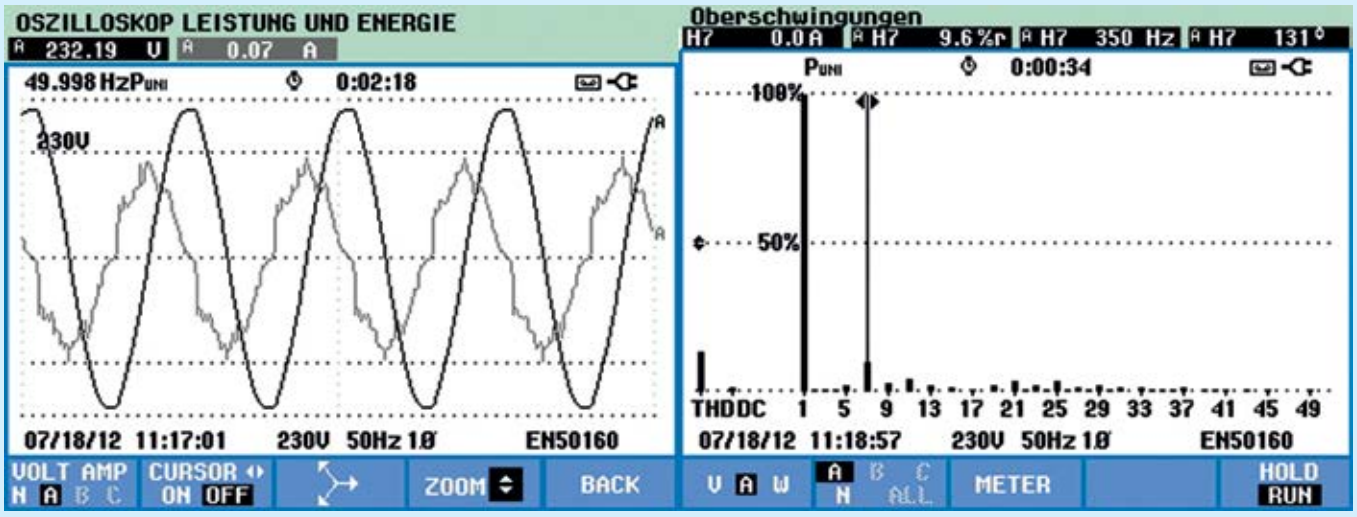
Elektronik zu verstehen. Vielmehr sollten umgekehrt die Netze so ausgelegt werden, dass sie mit der neuen Art von Belastung fertig werden, die der technische Fortschritt mit sich bringt.

8.2 Heute

Davon unabhängig lässt sich zur Zeit z. B. an Fernsehgeräten und PC-Netzteilen beobachten, dass die Grenzwerte der IEC 61000-3-2 großenteils ‚freiwillig', ohne normativen Zwang, unterboten werden – schlichtweg, weil dies nahezu nichts mehr kostet. Wies ein altes Fernsehgerät mit Bildröhre noch einen THD*I* von 75 % auf, so sind es bei einem modernen LCD- oder LED-Fernseher nur noch etwa 30 %. Die sehr viel größeren Bildschirme ließen zwar die Leistungsaufnahme ansteigen, obwohl die neue Technik an sich sparsamer ist, aber der absolute Ausstoß, etwa der dritten Oberschwingung, fiel in einem Beispielfall von 234 mA auf 156 mA.

Die Folgen sind deutlich messbar: verursachte die Fußball-Weltmeisterschaft 2002 in einem Wohngebiet noch einen einsamen Spitzenwert von THD*U* = 5,3 %, so waren es bei der Europameisterschaft 2008 in demselben Wohngebiet nur noch 3,6 %, und 2013 brachte es der zweite Weihnachtsfeiertag – trotz ausgesprochener ‚TV- und PC-Witterung', dazu noch mit 18 Stunden Dunkelheit und 6 Stunden Dämmerung, nur noch auf ein Minimum 1,8 % (um 8:30 Uhr) und ein Maximum von 2,6 % THD*U*. (um Mitternacht).

Auffällig ist, dass vor 10 Jahren starke Schwankungen im Tages- wie im Wochenrhythmus zu erkennen waren (Bild 56), während sich der THD heute mit etwa 2,5 % mehr oder weniger konstant über den Tag zieht (Bild 57). Offenbar handelt es sich bei den Verursachern heute eher um jene, die ständig am Netz verbleiben. So werden z. B. Heizungspumpen verstärkt mit drehzahlveränderlichen Antrieben versehen.



Quellen: S. Fassbinder/ep

58 Ein Kondensator von nur 1 µF, ans Netz geschaltet, zeigt, wie die Spannung wirklich beschaffen ist, weil im Strom die höherfrequenten Anteile verstärkt auftreten (hier aufgenommen in einem Bürogebäude)

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

8.3 Morgen

Geradewegs in die andere Richtung läuft der Trend in der Industrie. Der ZVEI schätzt, dass bislang etwa 7 % bis 8 % aller Antriebe in der Industrie mit einem Frequenzumrichter ausgestattet seien; sinnvoll und nützlich sei dies jedoch bei rund der Hälfte aller Antriebe. Somit sollte die Anzahl der Frequenzumrichter in den nächsten Jahrzehnten etwa um den Faktor 7 zunehmen.

Wenn man bedenkt, dass diese Umrichter bis hin zu großen Bauleistungen von mehreren 100 kW zumeist nur mit einer passiven Eingangsstufe mit B6-Gleichrichter bestückt sind, die bei den kleinen Anschlussleistungen über gar keine, bei den großen lediglich über eine partielle passive Filterung verfügen, so wird schon klar, was dort auf uns zukommt.

Die Nachfolger der Oberschwingungen sind zudem die Filterströme [25], die sich den Betriebsströmen überlagern und die Spannungskurve verzerren – ohne dass man dies auf einem einfachen Oszilloskopbild unmittelbar sieht. Man muss aber nur einen Kondensator direkt an die Netzspannung legen und den Strom betrachten, der sich hier einstellt (Bild 58). An dessen Kurvenform erkennt man, was hier noch auf uns zukommt – und keinem stringenten Bildungsgesetz folgt wie bei den Harmonischen. Ein hochwertiges Messgerät bietet noch entsprechend mehr Detailtreue (Bild 59). Der Versuch funktioniert mit jeder beliebigen Kapazität; die Stromkurve bietet immer das gleiche Bild. Nur der Strommaßstab ändert sich.

Der größte Teil der industriellen Antriebe – etwa zwei Drittel – bedienen Lüfter und Pumpen. Eine aktive Bremsung mit Rückspeisung ins Netz kommt hier nicht in Frage, und damit fehlt der unmittelbare Anlass zum Einsatz aktiver Eingangsstufen. Dafür, dass dennoch hochfrequente Betriebsströme zum Fließen kommen werden – noch dazu über den PE-Leiter, wohin sie nicht gehören – sorgt schon der Zwischenkreis.

Von dort breiten sich diese Ströme – zum Teil über die Schirmkapazität der Motor-Anschlussleitung – sowohl nach vorne zum Motor als auch nach hinten ins Netz aus. Die weitgehende gegenseitige Kompensation von Oberschwingungs-Frequenzen zwischen Außenleiter und Neutralleiter gegen die jeweils entsprechenden gleicher Frequenz zwischen den Außenleitern, aber um 150° (sprich fast 180°) versetzt, hat schon früher nicht funktioniert. Die jeweiligen Quellen waren durch große Entfernungen und mehrere Transformatorstufen zwischen ihnen entkoppelt. Nun aber klappt dies erst recht nicht mehr, weil die verzerrenden Einphasenlasten verschwinden und die dreiphasigen zunehmen. So bleiben uns beide Probleme erhalten, die Harmonischen und die hochfrequenten Ableitströme. Aber wir bleiben dran.

9 Nachbemerkungen zum Sprachgebrauch

„Wer in Elektrotechnik schlecht ist, muss wenigstens in Deutsch gut sein“, sagt ein schon bekannter Zyniker [24]. Deutsche Normen folgen dem Prinzip, durch klar definierte Begriffe sowie andere Sprachkonventionen stets eindeutig und unverwechselbar auszudrücken, was gemeint ist. Jedenfalls im Prinzip besteht dieses Prinzip. Im Zuge der Globalisierung werden auch Normen heute vorwiegend auf internationaler Ebene erstellt, und VDE-Normen sind prinzipiell nur noch deutsche Übersetzungen von IEC-Normen.

Freilich – die ersten der unzähligen Abkürzungen, die ein Neuling lernt, ist SNC (special national condition – besondere landesspezifische Bedingung; das kann geografische, klimatische oder technische, im Sonderfall auch politische Besonderheiten betreffen) und SCN (some countries note – auf bestimmte Länder anzuwendende Anmerkungen). Die wesentlichen Inhalte, sprich Anforderungen, sollten aber gleich lauten.

9.1 Fallen bei der Übersetzung

So sind auch die Modalitäten zur Übersetzung von Normen genormt, und heraus kommt ein Text, der sich nach Stil, Sprachgebrauch und Vokabular genau so liest wie eine Original-VDE-Norm. Nicht immer, aber immer öfter kommt es jedoch vor, dass eine provisorische Arbeitsübersetzung ohne die routinemäßige Nachbearbeitung dazwischen rutscht.

Die VDE 0838 ist ganz offensichtlich eines der Opfer:

„Die in Abschnitt 7 festgelegten Grenzwerte für Oberschwingungen gelten für die Außenleiter-Netzströme und nicht für die Ströme im Nullleiter“, heißt es dort (Absatz 6.2.1) unter anderem. Der vor Urzeiten nicht nur abgeschaffte, sondern wenig später auch geächtete „Nullleiter“ hat so bei der Übersetzung aus der IEC 61000-3-2 den Weg zurück in eine nagelneue VDE-Norm geschafft.

„Der Mittelwert für die einzelnen Oberschwingungen, der über die gesamte Beobachtungsdauer gewonnen wurde, muss kleiner oder gleich den anwendbaren Grenzwerten sein“, liest man wenig später (Absatz 6.2.3.4). Ein ganz typischer Übersetzungsfehler hat sich hier ereignet, wie er immer wieder gern genommen wird: Es waren natürlich die „anzuwendenden Grenzwerte“ gemeint. „Anwendbare Grenzwerte“ darf man anwenden; „anzuwendende Grenzwerte“ muss man anwenden. Im Englischen hieße es beide Male „applicable“; dies deckt beide Bedeutungen ab. Es ist bedauerlich, dass der Unterschied im Englischen verloren geht, aber damit muss man leben. Die falsche deutsche Wiedergabe weist den Nutzer jedoch in die falsche Richtung.

Besondere Freude kommt bei Sätzen wie z. B. 6.2.2 auf (ja, es ist tatsächlich nur einer):

Zuverlässig und immer griffbereit

2000 Fachwörter:

von Ableiter bis Zwickel
kurz – knapp – kompetent

- Nachschlagewerk mit kurzen präzisen Erläuterungen zu Fachausdrücken und Wortkürzungen
- Hinweise auf aktuelle Normen und weiterführende Fachliteratur
- Wichtige Stichwörter und Abkürzungen sind auch in Englisch angegeben

10 % Preisvorteil für ep-Abonnenten

Elektrotechnik - Lexikon,
2., stark überarb. Aufl., 54,00 €,
Bestell-Nr. 3-341-01466-7,
Autor: R. Müller

Jetzt bestellen!

www.elektropraktiker.de/shop
oder Bestellschein hinten im Heft

ep shop

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

- „Um nicht eine Leistung anzugeben, bei der sich die Grenzwerte schlagartig ändern, wodurch sich ein Anlass für Zweifel, welche Grenzwerte gelten, ergeben würde, kann der Hersteller jeden Wert, der innerhalb ±10 % des tatsächlichen Wertes liegt, angeben und diesen für die Bestimmung der Grenzwerte für die ursprünglich von ihm durchgeführte Konformitätsbewertungsmessung verwenden."

Hier hat der Übersetzer aber überflüssigerweise eine Eigentümlichkeit der deutschen Sprache exzessiv ausgewalzt, die in der englischen Sprache gar nicht besteht. Dies kann also im Original so nicht gestanden haben und ist auch im Deutschen in diesem Maß weder notwendig noch schön noch für das Verständnis sinnvoll. Der Satz ließe sich durch zwei kleine Umstellungen schon geringfügig verbessern:

- „Um nicht eine Leistung anzugeben, bei der sich die Grenzwerte schlagartig ändern, wodurch sich ein Anlass für Zweifel ergäbe, welche Grenzwerte gelten, kann der Hersteller jeden Wert angeben, der innerhalb ±10 % des tatsächlichen Wertes liegt, und diesen für die Bestimmung der Grenzwerte für die ursprünglich von ihm durchgeführte Konformitätsbewertungsmessung verwenden."

Auf typisch Normendeutsch jedoch läse sich der Satz wie folgt:

- „Zur Vermeidung der Angabe einer Leistung mit sich sprungartig ändernden Grenzwerten, wodurch sich Anlass für Zweifel hinsichtlich der Gültigkeit der Grenzwerte ergäbe, kann der Hersteller jeden nicht mehr als ±10 % vom tatsächlichen Wert abweichenden Wert angeben und diesen für die Bestimmung der Grenzwerte für die ursprünglich von ihm durchgeführte Konformitätsbewertungsmessung heranziehen."

Eine gewisse Entflechtung hätte darüber hinaus die Lesbarkeit verbessert:

- „Sich sprungartig ändernde Grenzwerte können Anlass für Zweifel hinsichtlich der Gültigkeit der Grenzwerte ergeben. Zu deren Vermeidung kann der Hersteller jeden nicht mehr als ±10 % vom tatsächlichen Wert abweichenden Leistungswert angeben. Diese Angabe wird dann für die Bestimmung der Grenzwerte für die ursprünglich vom Hersteller durchgeführte Konformitätsbewertungsmessung herangezogen."

Doch dies ist im Original-Normendeutsch leider auch nicht üblich.

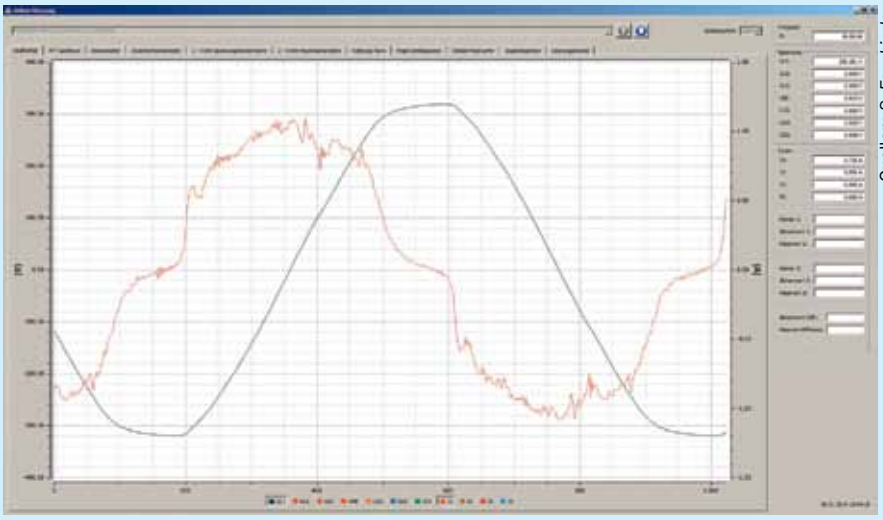
9.2 Terminologie

Noch während der laufenden Artikelserie meldete sich ein Leser mit dem Hinweis, die Begriffe „Oberschwingungen" und „Harmonische" würden dort gemäß offizieller Definition „unsauber" verwendet. Dies war nicht das erste Mal; andere vertraten in Zuschriften auf frühere Veröffentlichungen schon die gleiche Ansicht [26]. Tatsächlich gibt es eine – um sie einmal so zu nennen – orthodoxe Definition, die die Begriffe folgendermaßen sortiert:

1. Harmonische → Grundschwingung (50 Hz);
2. Harmonische → 1. Oberschwingung (100 Hz);
3. Harmonische → 2. Oberschwingung (150 Hz) usw.

Orthodoxe Definitionen haben zweifelsfrei etwas für sich, sonst ist die Begrifflichkeit schnell im Chaos versunken. Insbesondere wenn selbst die sonst so exakten VDE-Normen den Buchstaben S normalerweise definitionsgemäß für die Scheinleistung, je nach Lust und Laune aber hier und da auch einmal für die Querschnittsfläche eines Leiters verwenden, während nach internationaler Konvention Flächen mit A (area) zu bezeichnen sind, ist das nicht in Ordnung. Weitere Beispiele lassen sich finden.

Im vorliegenden Fall aber ist es an der Zeit, die alte, nationale Festlegung zu den Akten zu legen. Dazu gibt es zwei Überlegungen:



Quellen: S. *Fassbinder*

59 Ein Wechselstrom-Kondensator 10 µF wird an real existierender Netzspannung betrieben (Wohngebiet – eine industrielle Umgebung lässt noch weitaus stärkere Verzerrungen der Stromkurve erwarten)

9.2.1 Nationale Überlegung

Vom Gleichstrom-/Gleichspannungsanteil war schon die Rede. Fraglos ist es logisch, dass die 100-Hz-Schwingung die erste Oberschwingung darstellt, wenn die Grundschwingung eine Frequenz von 50 Hz aufweist. Dann passt der Gleichanteil, die nullte Harmonische, aber nicht mehr in dieses Schema hinein – es sei denn als –1. (minus-erste) Oberschwingung. Das geht so aber bei den Kritikern sicher auch nicht durch. Schon allein deswegen wurden im Vorliegenden die Begriffe „Oberschwingungen" und „Harmonische" synonym verwendet, und zwar die Nummerierung als den Ordnungszahlen der jeweiligen Schwingungen entsprechend aufgefasst.

9.2.2 Internationale Überlegung

Erschwerend kommt hinzu, dass heute, wie schon ausgeführt, die Erarbeitung von Normen auf internationaler Ebene und damit zunächst einmal in englischer Sprache durchgeführt wird. Die Übersetzung in 10 Sprachen erfolgt nach dem IEV (International Electrotechnical Vocabulary [27]), das zudem einen nummerierten Index und diesem eindeutig zugeordnet in englischer, französischer, spanischer und deutscher Sprache zudem genaue Definitionen der Begriffe umfasst, und daraus geht eindeutig hervor:

- Die „Harmonische" heißt auf Englisch „harmonic" (IEV 801-30-03);
- die „Oberschwingung" hingegen heißt auf Englisch ebenfalls „harmonic" (IEV 101-14-51 u. a. Fundstellen)!

Hier bekommen die Orthodoxen ein Problem. Es täte uns im Übrigen beispielsweise auch ganz gut, einmal zu überdenken, ob wir auf dem Unterschied zwischen Kabeln und Leitungen

- Kabel (engl. cable; IEV 151-12-38) und
- Leitung (engl. cable; IEV 151-12-27)

wirklich so lange herum reiten sollten, bis wir endlich merken, dass wir ein totes Pferd reiten. Ganz im Gegensatz zu den vorgenannten dient diese Unterscheidung nämlich zu nichts. Leiden wir denn an Problemmangel? Oder machen wir uns doch vielleicht manchmal das Leben etwas schwerer als unbedingt nötig?

Literatur

[24] www.sv-otto.de
[25] *S. Fassbinder:* „Entstörfilter – Verursacher von Schutzleiterströmen". Elektropraktiker Berlin 64 (2010) 12, S. 1039 ff.
[26] *A. J. Roos:* Fehlleitungen zur Elektrotechnik. Bad Wörishofen: Selbstverlag, 2. Aufl. 2002.
[27] Das internationale elektrotechnische Wörtbuch nach IEC 60050 gibt es online unter: www.electropedia.org.

lizensiert für PK elektronik Poppe GmbH, Velten (17109531)

ep *ELEKTROPRAKTIKER*-Leserservice, 10400 Berlin, Fax 030 42151-232
Tel. 030 42151-404, E-Mail: bestellung@huss-shop.de

BESTELLSCHEIN

Ich bestelle auf Rechnung: ❑ als ep-Abonnent (Kunden-Nr. .....) ❑ als Neukunde

Zeitschrift

Expl.	Artikel	€/Jahr	zzgl. Porto (Inland)
	Leseprobe der Zeitschrift ep Elektropraktiker[1] ❑ mit Online-Paket epPLUS	0,00 €	0,00 €
	Jahresabo der Zeitschrift ep Elektropraktiker[2], 12 Ausgaben jährlich	67,80 €	9,60 €
	Jahresabo der Zeitschrift ep Elektropraktiker mit Online-Paket epPLUS[2] Beinhaltet neben den 12 Ausgaben jährlich, 4 Ausgaben der Zeitschrift ep-Photovoltaik, das Online-Archiv, den Online-Normendienst und die monatliche Aktualisierungsmeldung	108,00 €	9,60 €

[1] Melde ich mich 14 Tage nach Erhalt des Probeheftes nicht, möchte ich die Zeitschrift (mit/ohne epPLUS) für mind. ein Jahr zu den bekannten Konditionen weiter beziehen.
[2] Das Abonnement verlängert sich automatisch um ein Jahr, wenn es nicht bis spätestens 6 Wochen vor Ablauf des Kalenderjahres schriftlich gekündigt wird.

Sonderhefte (Gedruckte Hefte)

Expl.	Artikel	€/Stück[3]
	Blitz- und Überspannungsschutz	15,00 €
	Energieeffizienz	15,00 €
	Erneuerbare Energien 2	15,00 €
	Gebäudeautomation Teil 1	15,00 €
	Gebäudeautomation Teil 2	15,00 €
	Gebäudeautomation Teil 1 + 2 (Paketpreis)	20,00 €
	Gebäudeinstallation	15,00 €
	Kleinsteuerungen	15,00 €
	Rechtssicherheit für Elektrofachkräfte	15,00 €
	Sicherheitstechnik	15,00 €

Sonderhefte (digitale Version)

Expl.	Artikel	€/Stück[3]
	Blitz- und Überspannungsschutz	15,00 €
	Kleinsteuerungen	15,00 €
	Messen und Prüfen	15,00 €

Software ep INSTROM

Expl.	Artikel	€/Stück[3]
	Demoversion	0,00 €
	Vollversion für Neukunden	499,00 €
	Update für instrom pro 4.0 Wohnungs-/Gewerbeb.	199,00 €
	Update für instrom pro 4.0 Wohnungsbau	249,00 €
	Update für ältere Versionen	349,00 €

Bücher

Expl.	Artikel	€/Stück[3]
	ep-Bibliothek:	
	Prüfung ortsfester und ... (Bödeker/Lochthofen)	39,80 €
	Brandschutz in d. Elektroinstallation (Schmidt)	29,80 €
	EIB/KNX (Frank)	29,80 €
	Elektrotechnik-Lexikon (Müller)	54,00 €
	Explosionsschutz in elektrischen Anlagen (Pester)	48,00 €
	Mittelspannungsanlagen (Schmidt/Hempel)	39,80 €
	Schutz bei Kurzschluss in elektrischen Anlagen (Kny)	29,80 €
	Stationäre Batterie-Anlagen (Schoop)	29,90 €
	Weitere:	
	Handbuch Schutztechnik (Doemeland)	58,00 €
	Mittelspannungstechnik (Böhme)	68,00 €

Sammelordner (Hardcover)

Expl.	Artikel	€/Stück[3]
	für einen Jahrgang	6,50 €

ep Jahrgangs-CD-ROM

Expl.	Artikel	€/Stück[3]
	❑ 2010 ❑ 2009 ❑ 2008 ❑ 2007 ❑ 2006 ❑ 2005 ❑ 2004 ❑ 2003 ❑ 2002 ❑ 2001 ❑ 2000	10,00 €

[3] ep-Abonnenten erhalten 30% Preisvorteil beim Kauf von Sonderheften, 25 % beim Kauf der KFE vom ZVEH und 10% beim Kauf von Büchern der ep-Bibliothek. Pro Bestellung werden max. 4,90 € Porto- und Versandkosten berechnet.
[4] Netto-Preise zzgl. 19% MwSt. epPLUS-Kunden gewähren wir 10 % Rabatt beim Erwerb der Software epINSTROM.

Kontaktdaten

Firma/Name, Vorname .....

z. Hd. .....

Straße/Nr. ..... Postfach .....

Land/PLZ ..... Ort .....

Telefon ..... Fax .....

E-Mail ..... ❑ Newsletter abonnieren

Datum ..... Unterschrift .....

Branche/Haupttätigkeit:

❑ Elektroinstallation/Handwerk
❑ Elektroplanung/Ing.-Büro
❑ Einzel- oder ❑ Großhandel
❑ Ausbilder/Dozent
❑ Azubi/Student
❑ Elektrofachkraft im Bereich: .....
❑ Sonstiges: .....

1403/BSC

Datenschutzhinweis: Ihre Daten werden von uns für die Auftragsabwicklung erfasst und gespeichert, und zur Information über aktuelle fachspezifische Themen und Angebote genutzt. Wenn Sie dies nicht wünschen, können Sie uns jederzeit in Textform an unsere Verlagsanschrift oder an: widerspruch@elektropraktiker.de widersprechen.

lizensiert für PK elektrotechnik Poppe GmbH, Wehlen (17.10953)