

# „Dirty Power“ Oberschwingungen durch nichtlineare Verbraucher

Dipl.-Ing. (FH) Günter Höck

GMC-I Gossen-Metrawatt GmbH

Thomas-Mann-Straße 16-20, 90471 Nürnberg

Tel: 0911 - 86 02 - 714

Fax: 0911 - 86 02 - 709

Guenter.Hoeck@gossenmetrawatt.com, www.gossenmetrawatt.com

## Einleitung

---

„Dirty Power“ – Schmutzige Energie. Wenn wir diesen Begriff in Verbindung bringen mit unserer elektrischen Energieversorgung, denken die meisten von uns wahrscheinlich an die bei der Erzeugung der elektrischen Energie durch Verbrennungskraftwerke entstehende Verschmutzung unserer Umwelt.

Doch darum soll es hier nicht gehen – ganz im Gegenteil. Es geht in diesem Beitrag um die Verschmutzung des vom Energieerzeuger gelieferten „Produktes“ – der Versorgungsspannung bzw. des Stromes – durch die am Versorgungsnetz betriebenen Verbraucher.

Während im Bereich des europäischen Verbundnetzes in den letzten Jahrzehnten der Schadstoffausstoß der Kraftwerke deutlich reduziert werden konnte, ist im gleichen Zeitraum die Verschmutzung der im Netz vorhandenen Spannung erheblich angestiegen. Insbesondere eine Zunahme der Oberschwingungen<sup>1</sup> – also eine Verzerrung der Sinusform der Spannung – ist zu beobachten. So hat sich zum Beispiel seit 1980 u. a. durch die massenhafte Verbreitung von Computern der Spannungsüberschwingungsgehalt der fünften Harmonischen im Durchschnitt mehr als verdoppelt.

- Wie entstehen diese Oberschwingungen?
- Welche Verbraucher sind besonders dafür verantwortlich?
- Welche Auswirkungen haben die Oberschwingungen?
- Wie kann man sie vermeiden oder reduzieren?
- Wie kann man sie messen?
- Welche Normen und Vorschriften sind diesbezüglich von Bedeutung?

Das sind die Fragen, die mit diesem Artikel beantwortet werden sollen.

---

<sup>1</sup> Auch wenn im allgemeinen Sprachgebrauch häufiger der Begriff „Oberwelle“ verwendet wird, ist „Oberschwingung“ die physikalisch korrekte Bezeichnung.

## Was sind überhaupt Oberschwingungen?

Zum besseren Verständnis der im elektrischen Versorgungsnetz auftretenden Oberschwingungen vorab ein klein wenig theoretische Grundlagen.

Jean Baptiste Joseph Fourier (franz. Mathematiker, 1768 - 1830) fand 1822 heraus, dass jedes nichtsinusförmige Signal durch eine Summierung von sinusförmigen Signalen dargestellt werden kann (Fouriersynthese) bzw. umgekehrt in lauter einzelne Sinusfunktionen zerlegt werden kann (Fourieranalyse). Hierbei gelten folgende Gesetzmäßigkeiten:

1. Ist das Signal periodisch, so besteht es aus lauter Sinusschwingungen, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache ( $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) der Grundfrequenz  $f_1$  sind. Die Grundfrequenz hat die gleiche Periodendauer wie das Gesamtsignal. Diese Komponenten bezeichnet man als „Grundschwingung“ und zugehörige „Oberschwingungen“ oder auch „Harmonische“ mit der Ordnungszahl  $n$ .  
Ist das Signal außerdem symmetrisch zur Nulllinie, so besteht es nur aus ungeradzahlig Vielfachen der Grundschwingung (Abb. 2-1 oben-links).
2. Folglich würde das Vorhandensein von Teilschwingungen mit nicht-ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz – so genannten „Zwischenharmonischen“ – bedeuten, dass das Signal unperiodisch ist bzw. dass sich aufeinander folgende Signalzyklen in der Kurvenform unterscheiden (Abb. 2-1 oben-rechts).
3. Eine Harmonische nullter Ordnung entspricht einer Verschiebung des Signals gegenüber der Nulllinie und somit einer Gleichkomponente (Abb. 2-1 unten-rechts).

Diese Zusammenhänge können mit den im Literaturverzeichnis unter [1] und [2] aufgeführten kostenlosen Lernprogrammen sehr gut veranschaulicht werden.

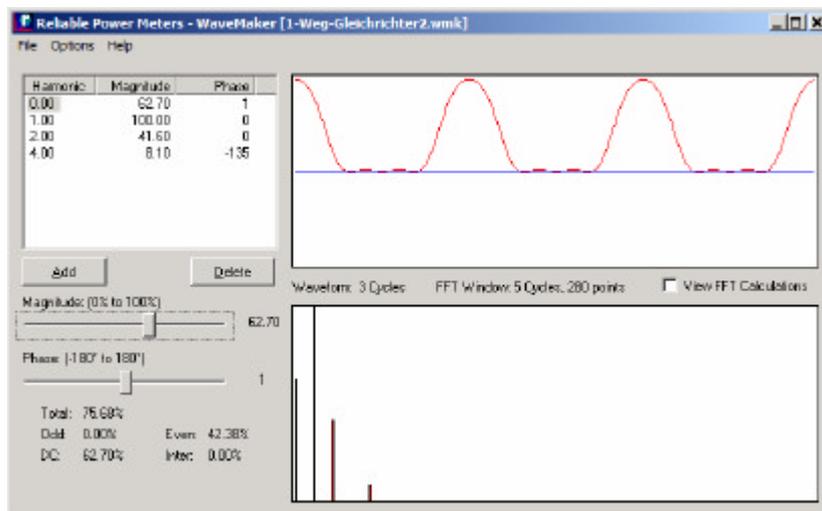
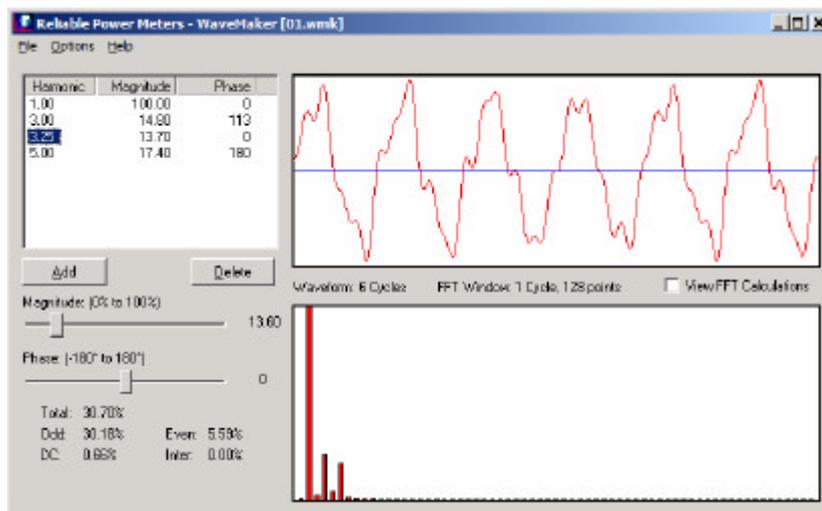
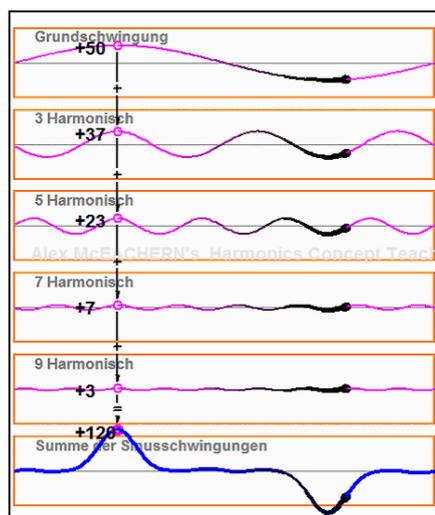


Abb. 2-1:

Erzeugung verzerrter Signalformen durch Addition von Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenz, Amplitude und Phasenlage

## Die Qualitätsmerkmale der elektrischen Energieversorgung

In der Regel wird die Qualität der Waren und Produkte, die wir im Alltag kaufen, durch den Hersteller oder Lieferanten bestimmt. Auch die vom *Energieversorgungsunternehmen* (EVU) an uns gelieferte elektrische Versorgungsspannung kann als Produkt betrachtet und seine Qualität anhand bestimmter Parameter beurteilt werden. Es ist aber eine spezifische Eigenschaft dieses Produktes, dass seine Qualität nur eingeschränkt vom Hersteller (Kraftwerksbetreiber) und Lieferanten (*Versorgungsnetzbetreiber*, VNB) festgelegt werden kann und ganz wesentlich vom Kunden (Verbraucher) mit beeinflusst wird.

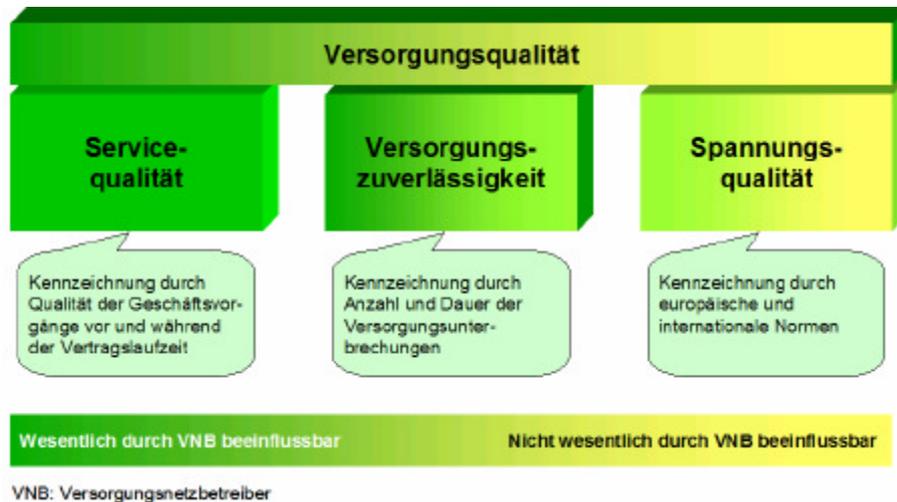


Abb. 3-1:

Die Versorgungsqualität im liberalisierten Markt [3]

Dies ist darin begründet, dass alle an das Versorgungsnetz angeschlossenen Verbraucher mehr oder wenig starke Rückwirkungen auf dieses Netz ausüben. Da dessen Impedanz nicht unendlich klein sein kann, führen diese Rückwirkungen wiederum zu Spannungsveränderungen im Netz.

Phänomen	Hauptursachen	Begrenzbar durch	
		Versorger	Verbraucher
Frequenzschwankung	Laständerungen, Verlust von Erzeugung	ja	nein
Langsame Spannungsänderungen	Laständerungen	ja	nein
Schnelle Spannungsänderungen / Flicker	Schalthandlungen, spezielle Lasten	nein	ja
Spannungsunsymmetrie	Unsymmetrische Belastung der Phasen	teilweise	ja
Oberschwingungen und Zwischenharmonische	Spezielle Geräte	teilweise	ja
Signalspannungen	Informationsübertragung	ja	ja
Gleichströme oder -spannungen	Spezielle Geräte (Einweggleichrichtung)	nein	ja
Spannungseinbrüche und -unterbrechungen	Fehler im Versorger- /Verbrauchernetz (Kurzschlüsse, Unterbrechungen)	nein	nein
Zeitweilige Überspannung	Fehler im Verbrauchernetz, Resonanzen im Netz	nein teilweise	teilweise nein
Transiente Überspannung	Blitzeinschläge, Schaltvorgänge	nein	nein

Tab. 3-1: Ursachen und Beeinflussbarkeit der Netzstörphänomene

## EN 50160 – Die europäische „Spannungsqualitätsnorm“

Es ist darum auch verständlich, dass die in der europäischen Norm EN 50160 [4] beschriebenen Eigenschaften der gelieferten Versorgungsspannung ein recht niedriges Qualitätsniveau definieren. Für die meisten der aufgeführten Merkmale gelten außerdem die Toleranzen bzw. Grenzwerte nur mit einer 95%-Summenwahrscheinlichkeit.

Sofern keine speziellen vertraglichen Vereinbarungen zwischen dem EVU und dem Kunden bestehen, gelten die in Tabelle 3-2 im Überblick zusammengefassten Anforderungen der Norm als Richtlinie für die am Anschlusspunkt an das öffentliche Versorgungsnetz (Nieder- oder Mittelspannung) unter „normalen Betriebsbedingungen“ zu erwartende „Mindestqualität“ der Spannung.

Sie gilt nicht innerhalb der kundenseitigen Installation oder bei Ausnahmesituationen (z. B. Naturkatastrophen, Sabotage, Streiks, höhere Gewalt, behördliche Anordnungen, Versorgungsengpässe aufgrund äußerer Einflüsse) und setzt auch voraus, dass die verwendeten Betriebsmittel den einschlägigen Normen und den technischen Anschlussbedingungen entsprechen.

Merkmals	Anforderungen	Messintervall	Betrachtungszeitraum
Netzfrequenz	Verbundnetz: 50 Hz +4%/-6% dauernd; 50 Hz $\pm$ 1% während $\geq$ 99,5% eines Jahres Inselbetrieb: 50 Hz $\pm$ 15% dauernd; 50 Hz $\pm$ 2% während $\geq$ 95% einer Woche	10-sec-Mittelwert	1 Jahr 1 Woche
Langsame Spannungsänderungen	$U_{\text{nenn}} +10\%$ / $-15\%$ dauernd; $U_{\text{nenn}} \pm 10\%$ während $\geq$ 95 % einer Woche	10-min-Mittelwert	1 Woche
Flicker / Schnelle Spannungsänderungen	Langzeitflickerstärke $Plt < 1$ während $\geq$ 95 % einer Woche und $\Delta U_{10\text{ms}} < 2\% U_{\text{nenn}}$	2 h (Flickermeter gemäß EN 61000-4-15)	1 Woche
Spannungsunsymmetrie	$U(\text{Gegensystem}) / U(\text{Mitsystem}) < 2\%$ während $\geq$ 95 % einer Woche	10-min-Mittelwert	1 Woche
Oberschwingungen $U_{h2} \dots U_{h25}$	$<$ Grenzwert lt. Tabelle 1-3 und THD $< 8\%$ während $>$ 95 % einer Woche	10-min-Mittelwert jeder Harmonischen	1 Woche
Zwischenharmonische	In Beratung		1 Woche
Signalspannungen	$<$ Normkennlinie = $f(f)$ während $\geq$ 99 % eines Tages	3-sec-Mittelwert	1 Tag
Spannungseinbrüche	Anzahl $<$ 10 ... 1000 / Jahr; davon $>$ 50% mit $t < 1\text{s}$ und $\Delta U_{10\text{ms}} < 60\% U_{\text{nenn}}$	10-ms-Effektivwert $U_{10\text{ms}} = 1 \dots 90\% U_{\text{nenn}}$	1 Jahr
Kurze Spannungsunterbrechungen	Anzahl $<$ 10 ... 1000 / Jahr; davon $>$ 70 % mit Dauer $<$ 1s	10-ms-Effektivwert $U_{10\text{ms}} \leq 1\% U_{\text{nenn}}$	1 Jahr
Lange Spannungsunterbrechungen	Anzahl $<$ 10 ... 50 / Jahr mit Dauer $>$ 3 min		1 Jahr
Zeitweilige Überspannung (L-N)	Anzahl $<$ 10 ... 1000 / Jahr; davon $>$ 70 % mit Dauer $<$ 1s	10-ms-Effektivwert $U_{10\text{ms}} > 110\% U_{\text{nenn}}$	1 Jahr
Transiente Überspannung	$<$ 6 kV; $\mu\text{s} \dots \text{ms}$		k. A.

Tab. 3-2: Die Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen nach DIN EN 50160

Konkret gelten für die einzelnen Harmonischen die in Tabelle 3-3 aufgeführten Höchstwerte in Prozent der für den Übergabepunkt vereinbarten Nennspannung, i. d. R. 230 V beim Niederspannungsnetz (L-N) bzw. 10 kV oder 20 kV (L-L) für den Mittelspannungsanschluss.

Ungerade Harmonische				Gerade Harmonische	
Nichtvielfache von 3		Vielfache von 3		Ordnung <i>n</i>	<i>U<sub>hn</sub></i> in % <i>U<sub>nenn</sub></i>
Ordnung <i>n</i>	<i>U<sub>hn</sub></i> in % <i>U<sub>nenn</sub></i>	Ordnung <i>n</i>	<i>U<sub>hn</sub></i> in % <i>U<sub>nenn</sub></i>		
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 ≤ <i>n</i> ≤ 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Tab. 3-3: Grenzwerte der Oberschwingungsspannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen nach DIN EN 50160

Der Gesamt-Oberschwingungsgehalt THD<sub>U</sub> (Total Harmonic Distortion)<sup>2</sup> der Spannung darf maximal 8 % betragen. Wie Abb. 3-2 zeigt, bedeutet dies bereits eine erhebliche Abweichung der Kurvenform von der idealen Sinuskurve. Übliche Werte für den THD<sub>U</sub> im Niederspannungsnetz liegen heute bei 2 ... 5 %.

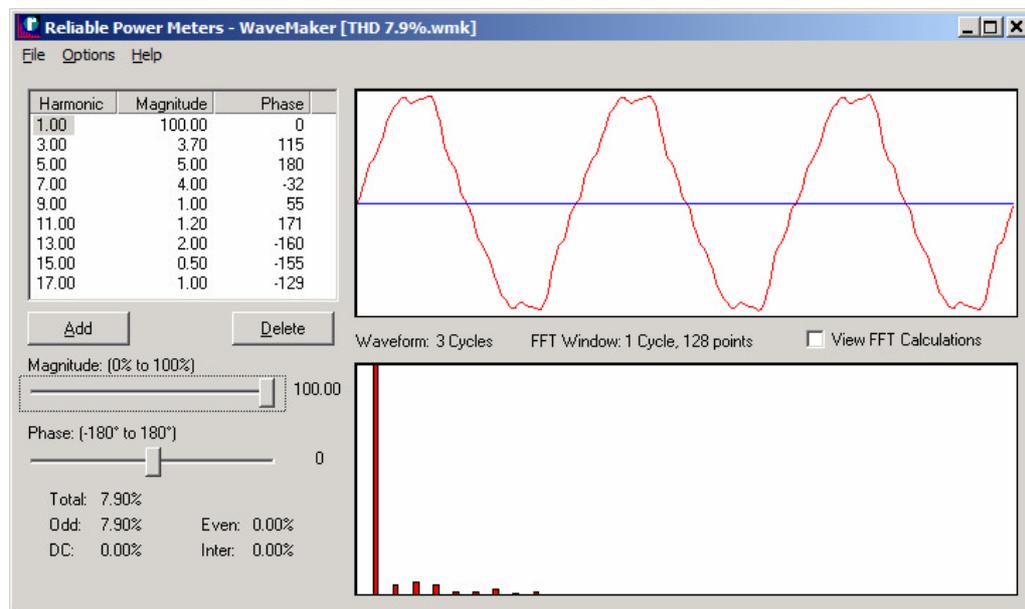


Abb. 3-2: Kurvenform eines AC-Signals mit einem THD von 7,9% (erstellt mit dem Lehrprogramm „WaveMaker“ [2])

<sup>2</sup> THD<sub>U</sub> = Gesamt-Oberschwingungsgehalt (auch: Grundschwingungskirrfaktor) der Spannung  
 = geometrische Summe der Effektivwerte aller Oberschwingungen / Effektivwert der Grundschwingung  

$$= \frac{\sqrt{U_{h2}^2 + U_{h3}^2 + \dots + U_{hm}^2}}{U_{h1}} * 100\%$$

## Wer erzeugt die Oberschwingungen im Netz?

Die vom dynamo-elektrischen Generator im Kraftwerk erzeugte 50-Hz-Wechselspannung hat eine fast perfekte Sinusform<sup>3</sup> mit sehr stabiler Frequenz, die auch von den Energieübertragungseinrichtungen (Transformatoren, Schaltanlagen, Leitungen) nicht nennenswert verformt wird. Konventionelle elektrische Verbraucher wie Glühlampen, Herdplatten, direkt betriebene Asynchronmotoren etc. erzeugen – vom Einschaltvorgang einmal abgesehen – ebenfalls keine größeren Verzerrungen, denn ihre Strom-/Spannungs-Kennlinie weist eine lineare Charakteristik auf. Dadurch ist der Stromverlauf  $i(t)$  proportional zum Spannungsverlauf  $u(t)$  und somit ebenfalls sinusförmig. Es kann zwar eine zeitliche Verschiebung um den Phasenwinkel  $\varphi$  zwischen dem Spannungs- und dem Stromverlauf auftreten, wenn sich außer den ohmschen Komponenten auch Induktivitäten oder Kapazitäten direkt im Wechselstromkreis befinden; dies führt dann bekanntlich zur Erzeugung von Blindleistung, nicht aber zu Oberschwingungen.

In fast jedem moderneren elektrischen Betriebsmittel finden wir heute aber mehr oder weniger umfangreiche Elektronik vor. Diese benötigt i. d. R. eine konstante Gleichspannung, die in einem Netzteil<sup>4</sup> mittels Gleichrichter und Glättungskondensator sowie evtl. noch nachgeschaltetem elektronischem Regler erzeugt wird. Das Nachladen des Kondensators erfolgt dabei pro Halbperiode der Wechselspannung nur mit einem kurzen, dafür aber um so höheren pulsartigem Strom – immer dann, wenn der Betrag der Spannung  $u(t)$  die verbliebene Spannung am Kondensator übersteigt. Die Strom-/Spannungs-Kennlinie ist somit nichtlinear. Das erzeugt die verzerrte Stromkurvenform, gleichbedeutend mit Oberschwingungen.

Die nebenstehende Abbildung 4-1 zeigt diese Wirkungsweise recht anschaulich (simuliert mit „PQ Teaching Toy [1]).

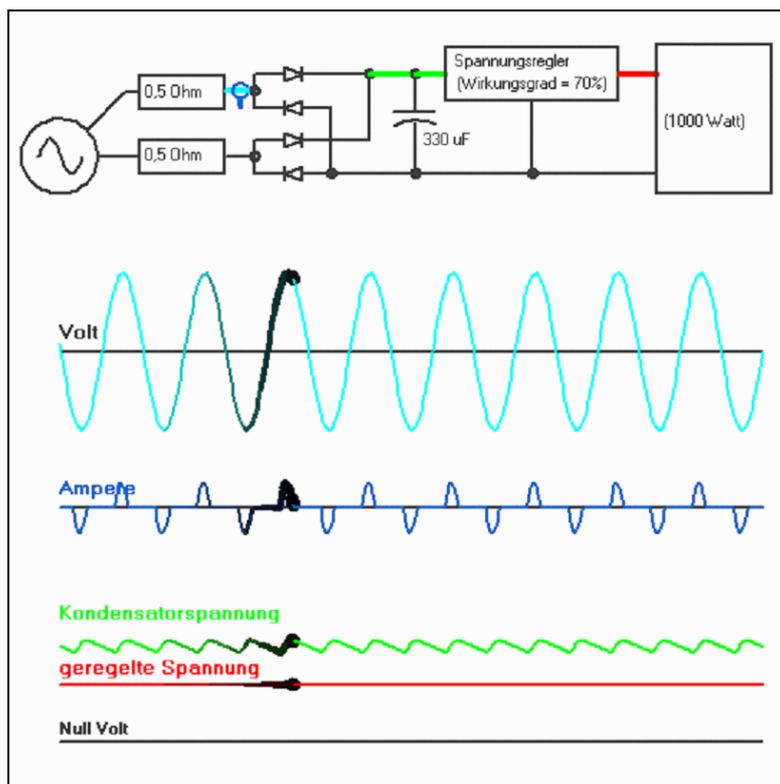
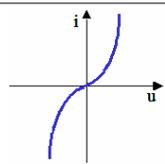
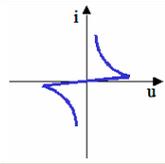
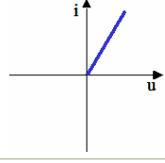
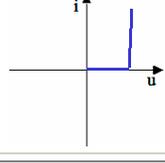
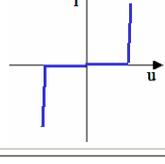


Abb. 4-1: Verlauf der Spannungs- und Stromsignale an einem Netzteil

Es gibt noch eine ganze Reihe anderer elektrischer Betriebsmittel mit nichtlinearem Verhalten. Je nach Kennlinie weisen Sie eine gewisse charakteristische Zusammensetzung und Höhe der erzeugten Oberschwingungsströme auf (Tab. 4-1). Aufgrund der Vielzahl und weiten Verbreitung von Geräten mit dem vorbeschriebenen Verhalten, gelten sie aber heute als die Hauptverursacher von Oberschwingungen im Versorgungsnetz.

<sup>3</sup> Etwas anders sieht dies leider bei der Stromerzeugung mittels Windenergie oder Photovoltaik aus: In beiden Fällen wird zunächst eine Gleichspannung erzeugt, welche dann über einen elektronischen Wechselrichter in eine 50-Hz-Wechselspannung umgewandelt und in das Netz eingespeist wird. Da der Wechselrichter nach dem Zehacker-Prinzip arbeitet und keine hundertprozentige Glättung des Ausgangsstroms erfolgt, werden somit auch höherfrequente Ströme eingespeist.

<sup>4</sup> In der Literatur zu dieser Thematik wird hier fast immer nur von „Schalt-Netzteilen“ gesprochen. Aber auch so genannte „Linear geregelte Netzteile“ zeigen im Prinzip das gleiche Verhalten. Der dort vorgeschaltete Transformator bewirkt aufgrund seiner Streuinduktivität – die aber z.B. bei Ringkerntransformatoren sehr niedrig ist – lediglich eine gewisse Abflachung der Stromimpulse. Allerdings findet man solche Netzteile wegen ihrer hohen Verlustleistung heute meist nur noch im Leistungsbereich bis ca. 100 W oder in Spezialanwendungen.

Ursache	Kennlinie	Beispiele	$(I_{hn} / I_{h1}) / \%$				
			$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 7$
Sättigung		Kleinmotoren		3...10		1...5	
		Transformator Magnetisierungsstrom		25...55		8...30	2...10
Gasentladung		Leuchtstofflampe	1...2	8...20		2...3	1...2
		Lichtbogenofen	5...12	6...12	2...5	3...7	1...3
Einweg-Gleichrichter mit ohmscher Last		Leistungshalbung thermischer Geräte (Fön, Heizdecke)	42		8		
Einweg-Gleichrichter mit kapazitiver Last		Einfache Netzgeräte mit niedriger Leistung (Unterhaltungselektronik)	70...90	40...60	35...50	25...50	12...25
Zweiweg-Gleichrichter mit kapazitiver Last		Netzgeräte (Fernsehgerät, Monitor, PC, Motorantriebe)		65...80		50...70	25...35

Tab. 4-1: Ursachen und Beispiele für die Entstehung von Oberschwingungsströmen [5]

## Auswirkungen und Maßnahmen zur Begrenzung von Oberschwingungen

### Eine theoretische Betrachtung

Bei sinusförmiger Kurvenform von Spannung und Strom kann sich aufgrund der Phasenverschiebung  $f$  durch induktive oder kapazitive Komponenten eine – relativ einfach kompensierbare – (Verschiebungs-) Blindleistung  $Q$  ergeben. Es entsteht das wohlbekannte Leistungsdreieck mit der Beziehung  $P = U \cdot I \cdot \cos f$ .

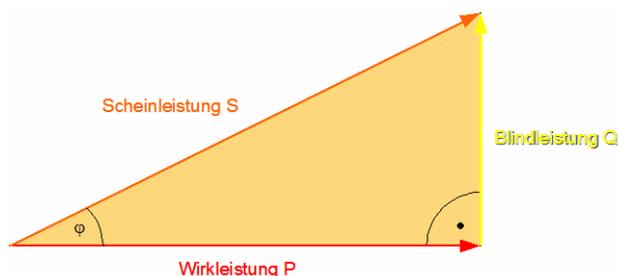


Abb. 5-1: Das Leistungsdreieck früher

Bei verzerrten Kurvenformen entsteht neben der Verschiebungsblindleistung  $Q_1$  auch Verzerrungsblindleistung  $D$ , die sich geometrisch zur Gesamt-Blindleistung  $Q$  addieren. Nun existiert nur noch die allgemein gültige Beziehung  $P = \sqrt{S^2 - Q^2}$  wobei  $Q = \sqrt{Q_1^2 + D^2}$ .

Der  $\cos f$  ist tot! Es lebe der Leistungsfaktor  $PF = P/S$  !

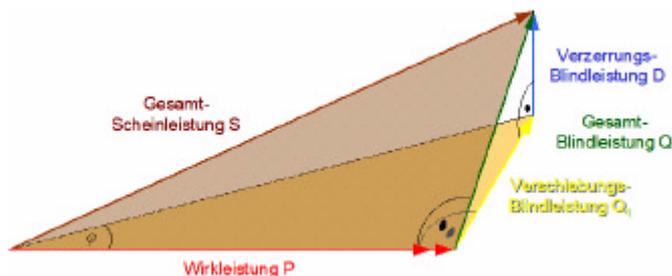


Abb. 5-2: Das Leistungsdreieck heute

## Auswirkungen in der Praxis

Oberschwingungsströme verursachen sowohl im Versorgungsnetz als auch innerhalb der Anlage Probleme. Die Auswirkungen und ihre Lösungen sind sehr unterschiedlich und müssen getrennt betrachtet werden. Die geeigneten Maßnahmen, um die Auswirkungen von Oberschwingungen innerhalb der Anlage zu beherrschen, müssen nicht unbedingt auch die im Netz verursachten Verzerrungen reduzieren und umgekehrt. Es gibt mehrere verbreitete Probleme, die durch Oberschwingungen verursacht werden. Sie sind hier nur stichpunktartig aufgeführt und dem Band „Oberschwingungen – Ursachen und Auswirkungen“ [6] aus der Schriftenreihe „Anwendungsleitfäden Netzqualität“ entnommen. Dort finden sich ausführliche Erläuterungen zu den einzelnen Phänomenen.

### Durch Oberschwingungsströme in Anlagen verursachte Probleme:

- Überlastung von Neutralleitern<sup>5</sup>
- Überhitzung von Transformatoren
- Fehlauslösung von Leitungsschutzschaltern / Leistungsschaltern
- Überbeanspruchung von Kompensations-Kondensatoren
- Skineffekte

Außerdem verstärken Oberschwingungsströme die Probleme mit magnetischen Wechselfeldern, die sich durch eine nicht EMV-gerechte Elektroinstallation ergeben können [7].

### Durch Oberschwingungsspannungen verursachte Probleme:

- Spannungsverzerrungen
- Überhitzung und Hochlaufschwierigkeiten von Drehfeldmotoren
- Nulldurchgangsstörungen (bei elektronischen Betriebsmitteln, die sich an den Nulldurchgängen orientieren)

## Begrenzungsmethoden für Oberschwingungen in Anlagen

Die Begrenzungsmethoden lassen sich grob in drei Gruppen einteilen:

- Passive Filter
- Trenntransformatoren und Oberschwingungs-Reduktionstransformatoren
- Aktive Filter

Jeder dieser Ansätze hat Vor- und Nachteile, so dass es keine Einzellösung gibt, die besser wäre als alle anderen. Ihre jeweiligen spezifischen Eigenschaften werden in [8], [9] und [10] eingehend dargelegt. Auch in [11] wird auf dieses Thema ausführlich eingegangen.

<sup>5</sup> In einem dreiphasigen System sind die Spannungsschwingungen der Phasen gegeneinander um  $120^\circ$  verschoben, so dass der Summenstrom im Neutralleiter, wenn jeder Außenleiter gleich belastet wird, zu Null wird. In der Vergangenheit haben Anlagenbauer (mit Genehmigung der normgebenden Behörden) diese Tatsache genutzt, um Neutralleiter-Querschnitte auf die Hälfte zu reduzieren. Wenn auch die Grundschwingungsströme sich ausgleichen, ist dies jedoch bei den Oberschwingungsströmen nicht der Fall – vielmehr addieren sich die Oberschwingungen durch drei teilbarer Ordnung im Neutralleiter. Dadurch kann der Strom im Neutralleiter größer als in jedem der Außenleiter werden! Dieser Effekt ist in Abb. 5-3 dargestellt. In diesem Diagramm sind die Außenleiterströme oben eingetragen und werden in Intervallen von  $120^\circ$  der Grundschwingung eingeführt. Die Oberschwingung dritter Ordnung jeder Phase ist identisch, da sie die dreifache Frequenz und damit ein Drittel des Phasen-Versatzes der Grundschwingung hat ( $3 \cdot 120^\circ = 360^\circ$ , entsprechend einem ganzen Schwingungszug). Der effektive Neutralleiterstrom der Oberschwingung dritter Ordnung ist im Diagramm unten eingetragen. In diesem Beispiel ergeben 70 % Strom der Oberschwingung dritter Ordnung in jedem Außenleiter (bezogen auf die Stromstärke der Grundschwingung pro Außenleiter) 210 % des Außenleiter-Grundschwingungsstroms im Neutralleiter.

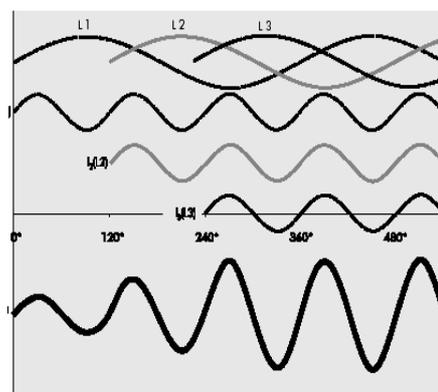


Abb. 5-3: Summierung der 3. Harmonischen im Neutralleiter

## Grenzwerte für Oberschwingungsströme von Verbrauchern

Da die Möglichkeiten zur Reduzierung von Oberschwingungen im Versorgungsnetz auf Seite des Netzbetreibers sehr eingeschränkt sind, muss darum auch auf Seite der Verbraucher eine Begrenzung erfolgen.

Seit Januar 2001 ist die Norm EN 61000-3-2 [12] endgültig in Kraft und definiert Grenzwerte für Oberschwingungsströme, die von elektrischen und elektronischen Geräten mit einem Eingangsstrom  $\leq 16$  A je Leiter<sup>6</sup>, die zum Anschluss an ein öffentliches Niederspannungs-Stromversorgungsnetz vorgesehen sind, verursacht werden.

Es gibt kaum eine andere Norm, um deren Inhalt und Inkrafttreten so lange zwischen den beteiligten Interessengruppen gestritten wurde, wie diese. Vor allem die Computerhersteller wehrten sich lange vehement dagegen.

Die Norm betrifft Geräte ab 75 W Leistung und unterteilt diese in vier Klassen:

**Klasse A:** Symmetrische 3-phasige Geräte; Haushaltsgeräte, ausgenommen Geräte der Klasse D

**Klasse B:** Tragbare Elektrowerkzeuge, nicht professionelle Lichtbogenschweißgeräte

**Klasse C:** Beleuchtungseinrichtungen

**Klasse D:** Geräte mit  $75 \text{ W} < P \leq 600 \text{ W}$ ; Geräte, die nicht in eine der vorstehenden Klassen eingeordnet werden können; PCs und Monitore; Radio-, Video-, TV-Geräte

Ordnung $n$	Max. Oberschwingungsstrom in A	
Ungerade	Klasse A	Klasse B
3	2,30	3,45
5	1,14	1,71
7	0,77	1,16
9	0,40	0,60
11	0,33	0,50
13	0,21	0,32
15 ... 49	$0,15 \cdot 15/n$	$0,23 \cdot 15/n$
Gerade	Klasse A	Klasse B
2	1,08	1,62
4	0,43	0,65
6	0,30	0,45
8 ... 50	$0,23 \cdot 8/n$	$0,35 \cdot 8/n$

Tab. 6-1: Grenzwerte für Geräte der Klassen A u. B

Klasse C	
Ordnung $n$	Max. Oberschwingungsstrom $I_{nn}$ in % von $I_{n1}$
2	2
3	$30 \cdot PF^7$
5	10
7	7
9	5
11 ... 49	3

Tab. 6-2: Grenzwerte für Geräte der Klasse C

Klasse D		
Ordnung $n$	Max. Oberschwingungsstrom	
	in mA/W	in A
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13	0,30	0,21
15 ... 49	$3,85/n$	$0,15 \cdot 15/n$

Tab. 6-3: Grenzwerte für Geräte der Klasse D

<sup>6</sup> Für Geräte mit Eingangsstrom  $>16$ A sind die Normen EN 61000-3-4 bzw. EN 61000-3-12 anzuwenden

<sup>7</sup>  $PF = P/S$ ; Leistungsfaktor = Wirkleistung/Scheinleistung

## Oberschwingungsmessungen

### Kurvenformen und Oberschwingungsspektren diverser 1-phasiger Verbraucher

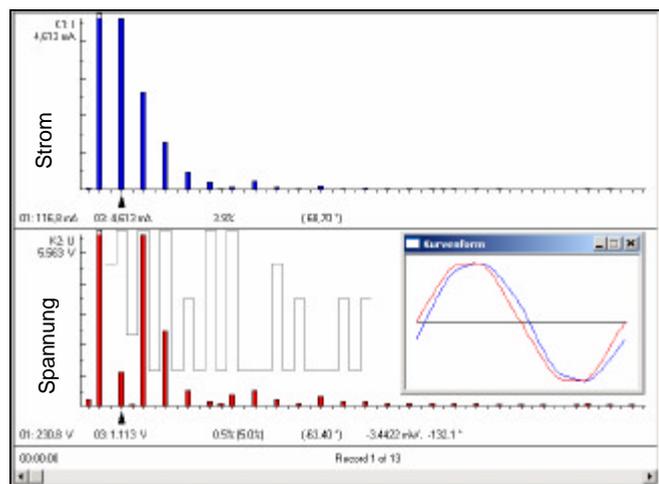


Abb. 7-1: NV-Halogenlampe mit 50-Hz-Trafo

#### NV-Halogenlampe mit 50-Hz-Trafo

Hier ist die Welt im Prinzip noch in Ordnung. Denn eine NV-Halogenlampe (Glühlampe) stellt ja einen linearen Verbraucher dar. Bei genauem Hinsehen ist jedoch folgendes erkennbar:

Eigentlich müssten alle Stromharmonischen (oben) die gleichen prozentualen Werte wie die jeweiligen Spannungsharmonischen aufweisen; die 3. Harmonische des Stroms zeigt jedoch einen höheren Wert. Ursache hierfür ist die an der Magnetisierungskennlinie des Kleintransformators entstehende, praktisch aber unbedeutende Verzerrung (vgl. Tab. 4-1).

Die Streuinduktivität des Transformators bewirkt außerdem die in der Kurvenformdarstellung erkennbare geringfügige Phasenverschiebung.

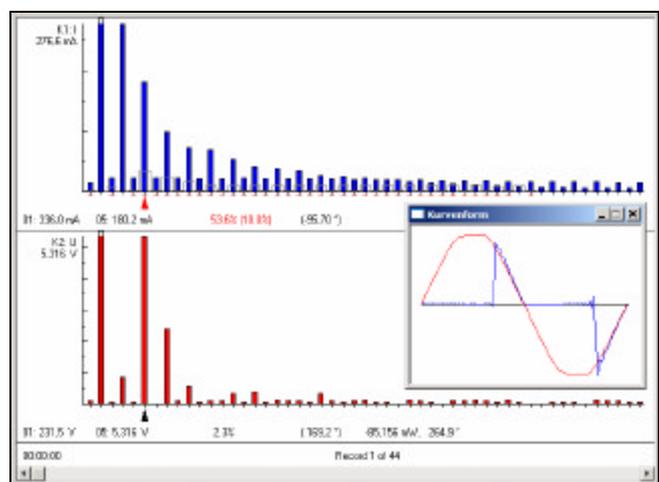


Abb. 7-2: Glühlampe mit Dimmer

#### Glühlampe mit Dimmer

Ganz anders sieht hier die Sache aus. Der mit Phasenanschnittsteuerung arbeitende Helligkeitsregler (Dimmer) dieser Stehlampe (Baujahr 1991) besitzt noch kein OberschwingungsfILTER und erzeugt sehr starke und – wegen den steilen Schaltflanken – auch höherfrequente Strom-Oberschwingungen, welche die seit 1995 für Beleuchtungseinrichtungen geltenden Grenzwerte der EN 61000-3-2 Klasse C (im Diagramm eingeblendet) um ein Vielfaches überschreiten.

In diesem Bauzustand dürfte das Produkt heute nicht mehr in Verkehr gebracht werden.

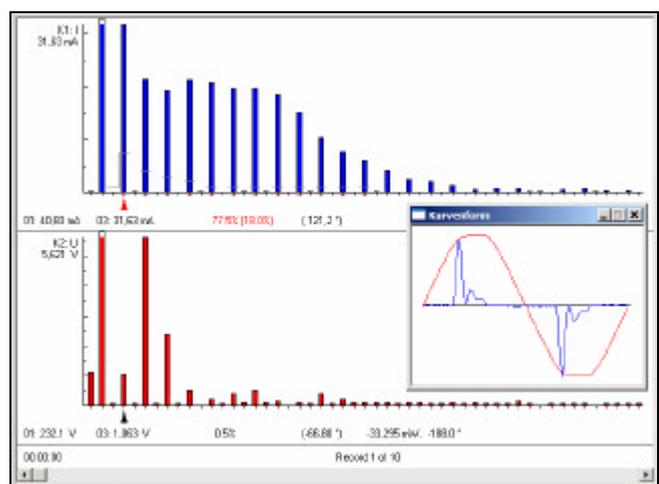


Abb. 7-3: Energiesparlampe

#### Energiesparlampe

Es geht aber noch schlimmer. Kompakt-Energiesparlampen mit Elektronischem Vorschaltgerät (EVG) weisen eine extrem verzerrte Stromkurvenform mit hohen relativen Oberschwingungsamplituden bis in den kHz-Bereich auf. Das nebenstehende Diagramm zeigt die Verhältnisse an einer 9-W-Kompaktsparlampe. Obwohl der Grundschwingungsstrom nur ca.  $40 \text{ mA}_{\text{eff}}$  beträgt, wurde sein Gesamt-Effektivwert mit ca.  $70 \text{ mA}_{\text{eff}}$  und der Spitzenwert mit über  $300 \text{ mA}_S$  gemessen (entspricht Crestfaktor  $CF_1 = 300/70 = 4,3$ ).

Dennoch sind diese Lampen normkonform und tragen das CE-Zeichen, denn die Grenzwerte der Norm EN 61000-3-2 gelten nur für Verbraucher ab 75W (Leuchtmittel ab 25W) Leistung. Aus ökologischer Sicht sind sie natürlich auch durchaus sinnvoll. Unter EMV-Gesichtspunkten allerdings weniger.

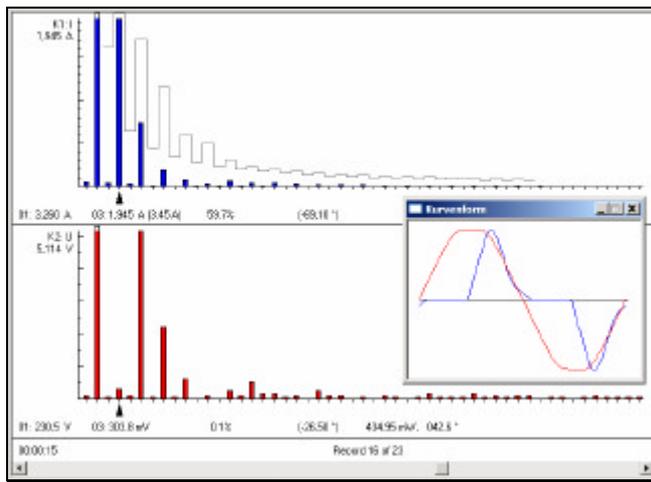


Abb. 7-4: Staubsauger mit Leistungssteuerung

### Staubsauger

Auch ein Staubsauger mit stufenlos verstellbarer Leistung arbeitet mit Phasenanschnittsteuerung. Die Induktivität des Motors wirkt aber hier stark dämpfend, zumindest für die höheren Harmonischen. Da außerdem für Staubsauger und ähnliche „tragbare Elektrowerkzeuge“ die recht hohen Grenzwerte der Klasse B gelten (weil diese meist nur kurzzeitig in Betrieb sind), kann ein solcher Verbraucher die Normgrenzwerte (im Diagramm eingeblendet) problemlos einhalten.

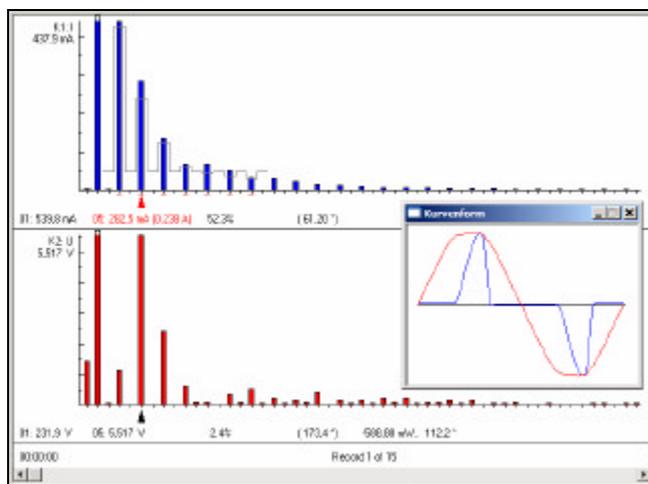


Abb. 7-5: Fernsehgerät

### Fernsehgerät

Praktisch jeder Haushalt verfügt heute über mindestens ein Fernsehgerät. Das im nebenstehenden Diagramm gemessene Gerät stammt aus dem Jahr 1996. Obwohl das darin enthaltene Schaltnetzteil laut Schaltplan außer dem obligatorischen HF-Funktentstörfilter zumindest auch eine Dämpfungsdrossel für niederfrequente Störungen besitzt (erkennbar auch am relativ sanften Anstieg der Stromkurve), können die Oberschwingungsgrenzwerte der EN 61000-3-2 Klasse D nicht ganz eingehalten werden. Die seinerzeit für Fernseh- und Rundfunkgeräte noch gültigen Grenzwerte gemäß EN 60555-2 [13] lagen etwas höher. Somit war auch dieses Gerät damals normkonform.

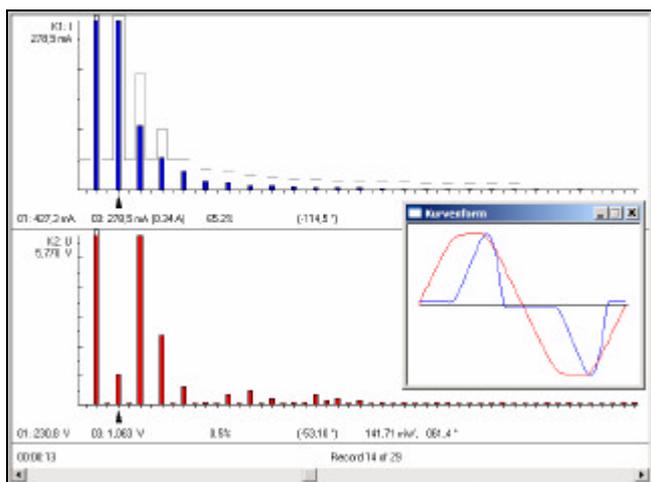


Abb. 7-6: Personal Computer

### Personal Computer (PC)

Vermutlich werden aber nicht nur in Deutschland bereits mehr Computer am Netz betrieben als Fernsehgeräte – allerdings nicht unbedingt gleichzeitig. Auch sie enthalten das berühmte Schaltnetzteil und zeigen somit die schon bekannte typische Stromkurvenform.

In manchen neueren PCs sowie auch in anderen elektronischen Geräten finden sich jetzt aber immer häufiger Netzteile mit sog. „Aktiver Leistungsfaktorkorrektur“ (*Power Factor Correction, PFC*). Diese Schaltungstechnik bewirkt eine nahezu sinusförmige Stromaufnahme mit minimaler Phasenverschiebung und somit hinsichtlich Oberschwingungen und Blindleistung ein fast ideales Verhalten, allerdings etwas zu Lasten der Stömpfindlichkeit, der HF-Emmissionen und natürlich des Preises.

Es gibt also durchaus sehr gute Lösungen zur Oberschwingungsreduzierung auf der Geräteseite. Aufgrund des relativ kurzen Lebenszyklus von Computern könnte hier sogar relativ bald eine spürbare Besserung eintreten – allerdings wohl nicht, wenn nur gilt: „Geiz ist geil“.

### Kurvenformen und Oberschwingungsspektren an einem Hausanschluss

In den elektrischen Verteileranlagen von Industriebetrieben und Bürogebäuden lassen sich häufig sehr hohe Oberschwingungsbelastungen nachweisen. Doch auch am Hausanschluss eines reinen Wohngebäudes sind heute kaum mehr sinusförmige Ströme vorhanden, wie die in Abb. 7-7 dargestellten Messdiagramme zeigen.

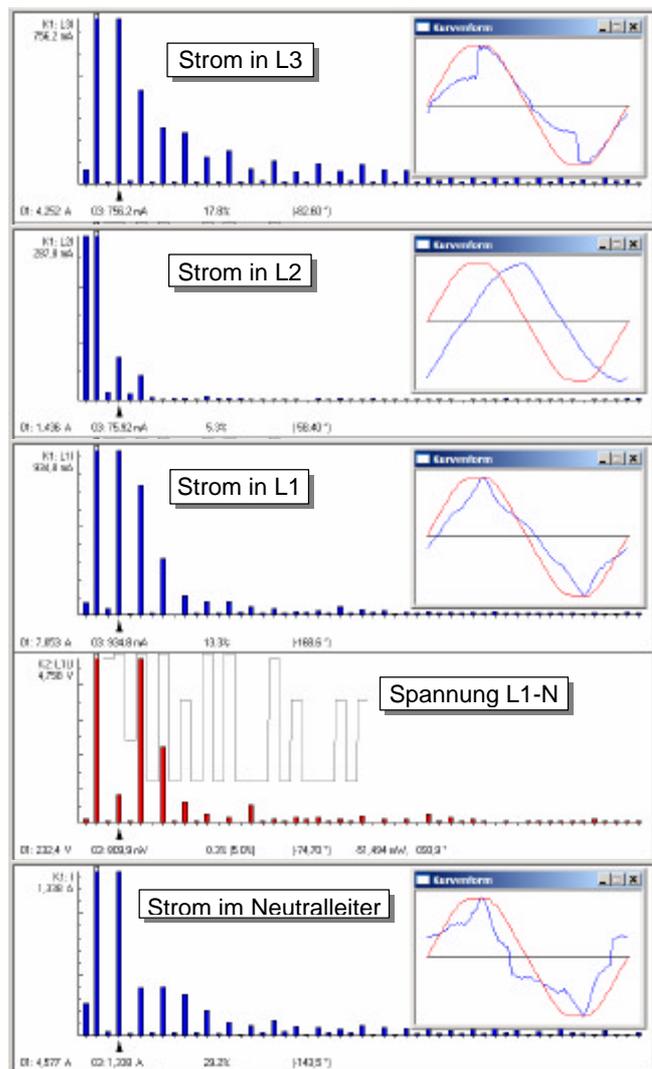


Abb. 7-7: Verhältnisse an einem Hausanschluss

Der Strom in Phase L3 zeigt eine deutliche Verzerrung mit ausgeprägten Harmonischen von >2 % bis zur 25. Ordnung (1,25 kHz). Die Kurvenform und Phasenlage lässt vermuten, dass hier überwiegend stetige und dimmergeregelte Glühlampenbeleuchtungen eingeschaltet sind.

Phase L2 ist nur relativ gering belastet und auch Oberschwingungsarm. Die Phasenlage des Stromes zur Spannung weist auf stark induktive Verbraucher hin, wie z. B. Elektromotoren von Kühlschränken oder von Umwälzpumpen einer Heizung.

Phase L1 hat zum Messzeitpunkt mit über 7 A und ca. 1,6 kW die höchste Belastung. Der Effektivwert der am stärksten ausgeprägten dritten Stromharmonischen beträgt immerhin fast 1 A. Aus der Kurvenform und Phasenlage des Stromsignals kann geschlossen werden, dass hier neben ohmschen und induktiven Verbrauchern auch mehrere Geräte mit Netzteilen (Fernseher, Videorecorder, PCs etc.) in Betrieb sind.

Die Spannungen an allen drei Phasen weisen die heutzutage typische, abgeflachte Sinuskurvenform auf. Von den Grenzwerten der EN 50160 sind ihre Oberschwingungen hier allerdings noch weit entfernt.

Da im Wohnbereich fast ausschließlich einphasige Verbraucher betrieben werden und im vorliegenden Fall neben einer deutlichen Schiefast auch erhebliche Oberschwingungsströme vorhanden sind, zeigt die Messung des Stroms im Neutralleiter, in welchem sich die Phasenströme ja geometrisch summieren, eine sehr stark verzerrte Kurvenform und einen keineswegs niedrigen Gesamt-Effektivwert.

### Kurvenform und Oberschwingungsspektrum an einem 3-phasigen Verbraucher

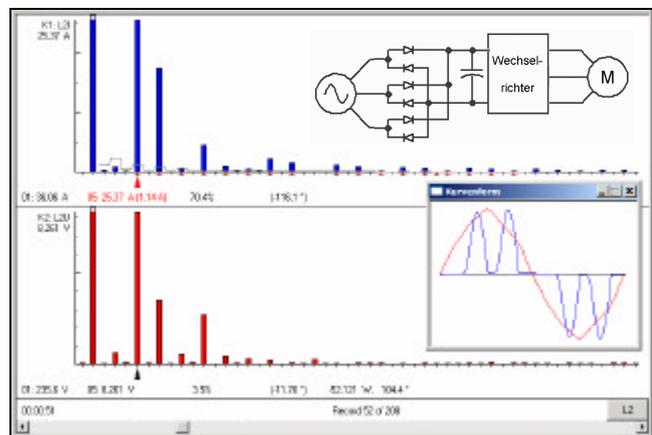


Abb. 7-8: Prinzipschaltbild, Kurvenform und Harmonische eines Frequenzumrichters

In industriellen Anlagen finden sich viele 3-phasige Betriebsmittel. Abb. 7-8 zeigt die typischen Kurvenformen einer Phase am Eingang eines elektronischen Frequenzumrichters (FU) mit 6-pulsiger Gleichrichtung. Auch hier sind die pulsartigen Ladeströme des Zwischenkreiskondensators erkennbar. Ihre Maxima liegen aber kurz vor und hinter dem Maximum des (auf Neutralleiter bezogenen) Spannungs-Sinus und führen deshalb nicht zu seiner Abflachung, sondern Anspitzung. FU-Hersteller argumentieren deshalb manchmal (nicht gänzlich zu unrecht), dass ihre Produkte die durch einphasige nichtlineare Verbraucher verbogene Spannungskurve wieder in Form bringen.

## Geräte zur Messung von verzerrten Kurvenformen bzw. Oberschwingungen



Abb. 8-1: Nur Geräte mit Echt-Effektivwertmessung (TRMS, rechts) messen kurvenformunabhängig richtig [14]

Analoge oder digitale Multimeter sind die am häufigsten verwendeten Messgeräte für elektrische Größen. Wichtiger aber als die Unterteilung der Geräte hinsichtlich ihrer Art der Messwertanzeige (analog oder digital) ist ihre Unterscheidung nach der Art des verwendeten Messprinzips für Wechselgrößen. Bei einfacheren, meist preiswerteren Multimetern erfolgt die Messwertbildung auf Basis des Betragsmittelwertes (Gleichrichtwert) des AC-Signals, skaliert auf den Effektivwert für Sinusform. Solche Geräte zeigen bei nichtsinusförmigen Signalen zu niedrige Messwerte. Zur korrekten Messung von Wechselströmen und -spannungen mit verzerrter Kurvenform müssen TRMS-Multimeter verwendet werden, die den „echten quadratischen Mittelwert“ (True-Root-Mean-Square) anzeigen [15]. Stehen beide Gerätearten für eine Messung zur Verfügung und zeigen stark unterschiedliche Messwerte, kann somit auf ein Messsignal mit hohem Oberschwingungsgehalt geschlossen werden. In Abb. 8-1 misst das linke Gerät den stark verzerrten Eingangsstrom eines Notebook-Netzteils um 44% zu niedrig.



Abb. 8-2: Manche Strommesszangen messen auch oberwellenrelevante Größen [16]

Zur Strommessung in Netzstromkreisen oder Erdungssystemen haben sich Strom- bzw. Leistungsmesszangen bestens bewährt. Auch hier ist auf das TRMS-Messprinzip zu achten. Hochwertigere Modelle bieten außer den üblichen Messfunktionen (A, V, f, W, VA, VAR, PF) auch Messgrößen, anhand derer Rückschlüsse auf die Oberschwingungsbelastung möglich sind, wie z. B. Gesamt-Oberschwingungsgehalt THD, Klirrfaktor DF (Distortion Factor) oder Scheitelfaktor CF (Crest Factor) bis hin zur Darstellung der Kurvenform oder des Oberschwingungsspektrums.



Abb. 8-3: Power Analyser liefern Details über jede einzelne Harmonische [17]

Mit den vorbeschriebenen Geräten ist meist nur eine kurzzeitige 1-phasige Messung möglich. Manchmal ist es allerdings unerlässlich, die Vorgänge im Netz simultan 3-phasig einschließlich des Neutralleiterstroms über einen längeren Zeitraum zu registrieren. Dann zeigen mehrkanalige Netz(stör)analysatoren (Power Analyser) ihre Leistungsfähigkeit. Moderne Ausführungen messen neben den einzelnen Harmonischen auch Zwischenharmonische und können diese Vielzahl an Messgrößen auf interne oder ansteckbare Speichermedien langfristig aufzeichnen und/oder über gängige Datenschnittstellen an direkt angeschlossene oder via Netzwerk/Modem verbundene Computer liefern, wo sie mittels spezifischer Programme eingehend analysiert werden können.

## Literatur

---

- [1] Power Standards Lab: PQ Teaching Toy; Alex McEACHERN's Lernprogramm über Netzqualität (Freeware); [www.powerstandards.com/PQTeachingToy/index.htm](http://www.powerstandards.com/PQTeachingToy/index.htm)
- [2] Reliable Power Meters: WaveMaker; Demo-Programm (Freeware) zur Darstellung von Harmonischen; [www.reliablemeters.com/html/software\\_demo\\_download.html](http://www.reliablemeters.com/html/software_demo_download.html)
- [3] Verband der Netzbetreiber – VDN e.V. im VDEW: Versorgungsqualität im liberalisierten Markt; [www.vdn-berlin.de/versorgungsqualitaet](http://www.vdn-berlin.de/versorgungsqualitaet)
- [4] EN 50160:2000-03 / deutsche Fassung DIN EN 50160:1999: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; BeuthVerlag Berlin
- [5] Gretsche, R.: Oberschwingungen in Stromversorgungsnetzen; Unterlagen zum Lehrgang „Spannungsqualität“ der Technischen Akademie Esslingen, 2001
- [6] Chapman, David: Harmonics – Causes and Effects; deutsche Übersetzung: Leitfaden Netzqualität / Oberschwingungen / Ursachen und Auswirkungen, Deutsches Kupferinstitut, Mai 2002; [www.kupferinstitut.de](http://www.kupferinstitut.de) und [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org)
- [7] Schauer, Martin: EMV-Probleme von elektrischen Anlagen in Gebäuden; in: „Energieversorgung & Mobilfunk“, Tagungsband der 4. EMV-Tagung des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V., 14.-15. April 2005 in Attendorn; Im Verlag des ANBUS e.V. Fürth, 2005, ISBN 3-9808428-8-6; S. 11-24
- [8] Fassbinder, Stefan: Leitfaden Netzqualität – Oberschwingungen – Es funktioniert: Passive Filter, Deutsches Kupferinstitut, Juni 2004; [www.kupferinstitut.de](http://www.kupferinstitut.de) und [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org)
- [9] Desmet, Jan: Harmonics – Selection and Rating of Transformers; Copper Development Association, November 2005; [www.cda.org.uk](http://www.cda.org.uk) und [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org)
- [10] Karve, Shri: Harmonics – Active Harmonic Conditioners; deutsche Übersetzung: Leitfaden Netzqualität – Netzfilter – Aktive Filter, Deutsches Kupferinstitut, Mai 2002; [www.kupferinstitut.de](http://www.kupferinstitut.de) und [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org)
- [11] Bajog, Gerd; Vachek, Heiko: „Clean Power“ – Effektive Filterung von Oberschwingungen; in: „Energieversorgung & Mobilfunk“, Tagungsband der 5. EMV-Tagung des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V., 22.-23. März 2006 in Stuttgart; Im Verlag des ANBUS e.V. Fürth, 2005, ISBN 3-9810359-1-7
- [12] DIN EN 61000-3-2 (VDE 0838 Teil 2): Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 3-2: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangstrom  $\leq 16A$  je Leiter); VDE Verlag Berlin/Offenbach
- [13] EN 60555-2 / IEC 555-2 (1982): Rückwirkungen in Stromversorgungsnetzen, die durch Haushaltgeräte und durch ähnliche elektrische Einrichtungen verursacht werden – Teil 2: Oberschwingungen; ersetzt durch [12]
- [14] GMC-I Gossen-Metrawatt GmbH: Digitalmultimeter ohne und mit TRMS-Messung; [www.gmc-instruments.com/deutsch/ugruppe/multimeterdigital.htm](http://www.gmc-instruments.com/deutsch/ugruppe/multimeterdigital.htm)
- [15] West, Ken: True RMS – The Only True Measurement; deutsche Übersetzung: Leitfaden Netzqualität / Oberschwingungen / Echt effektiv – die einzig wahre Messung, Deutsches Kupferinstitut, März 2002; [www.kupferinstitut.de](http://www.kupferinstitut.de) und [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org)
- [16] GMC-I Gossen-Metrawatt GmbH: Leistungsmesszangen mit Klirrfaktormessungen METRACLIP 71/81; [www.gmc-instruments.com/nettotabelle/zangenmessgeraete-uebersicht.htm](http://www.gmc-instruments.com/nettotabelle/zangenmessgeraete-uebersicht.htm)
- [17] GMC-I Gossen-Metrawatt GmbH: Dreiphasiger Energie- und Netzstöranalysator MAVOWATT 50; [www.gmc-instruments.com/deutsch/produkte/mavowatt50.htm](http://www.gmc-instruments.com/deutsch/produkte/mavowatt50.htm)