

1. Oberschwingungen, Begriffe und Definitionen

Begriff	Definition
Störgröße (disturbance)	Elektromagnetische Größe, die in einer elektrischen Einrichtung eine unerwünschte Beeinflussung hervorrufen kann.
Störfestigkeit (immunity)	Fähigkeit einer elektrischen Einrichtung, Störgrößen ohne Fehlfunktion zu überstehen.
Oberschwingungen (harmonic)	Sinusförmige Schwingungen, deren Frequenzen ein ganzzahliges Vielfaches (Ordnungszahl h) der Netzfrequenz sind.
Zwischenharmonische (interharmonic)	Sinusförmige Schwingungen, deren Frequenzen kein ganzzahliges Vielfaches (μ) der Netzfrequenz sind.

1 Störgröße, Störfestigkeit, Verträglichkeitspegel

Abb. 1.1 zeigt die Zuordnung der Störpegel nach Störquelle und Störsenke. Die Störfestigkeit ist eine gerätespezifische Eigenschaft. Das Gerät soll Störgrößen bis zur Höhe der Störfestigkeit ohne Beeinträchtigung ertragen, darf aber maximal die zulässigen Störpegel entsprechend der zugrunde zulegenden Norm aussenden. Die Verträglichkeitspegel sind weder Grenzwerte noch zulässige Werte.

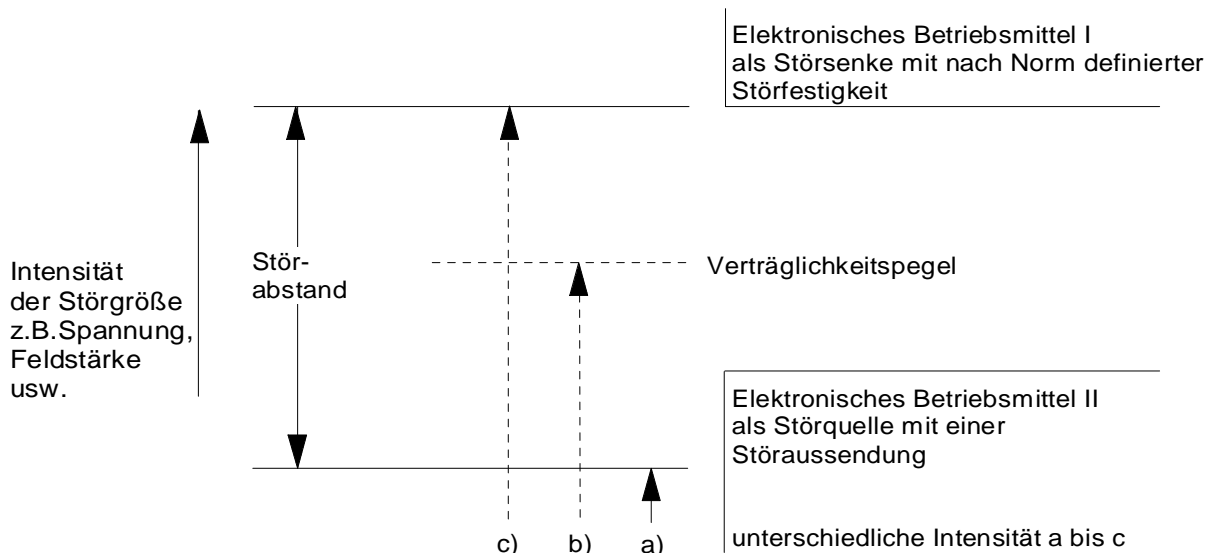


Abb. 1.1 Definition von Verträglichkeitspegeln und Zuordnung Störquelle - Störsenke (vgl. EN 61000-4-1)

Verträglichkeitspegel dienen dem Netzbetreiber als Beurteilungsgrundlage für die zulässige Störaussendung einer Anlage. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % kann bei Einhaltung der Verträglichkeitspegel davon ausgegangen werden, daß kein anderes an diesem Netz betriebenes Gerät in seiner Funktion beeinträchtigt wird.

2. Oberschwingungen, Zwischenharmonische, Verzerrungsfaktor THD u. a.

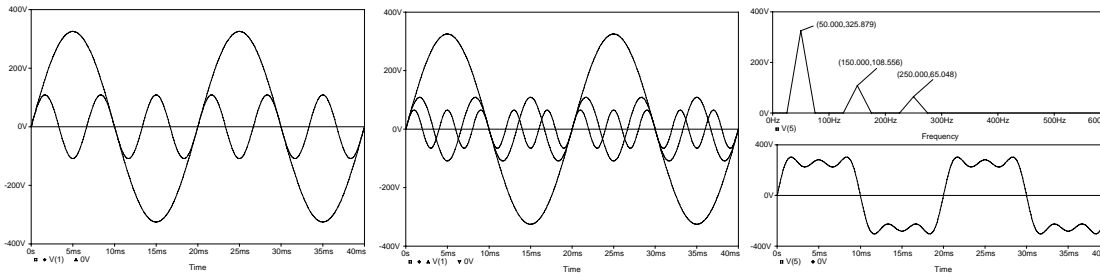
Fourier entwickelte ein mathematisches Verfahren, mit dem nichtsinusförmige Signale beschrieben werden können: Die **HARMONISCHE ANALYSE** oder auch **Fourier Transformation**.

Beispiel:

Bei der Überlagerung von drei sinusförmigen Spannungen

$$u_1 = \hat{u}_1 \cdot \sin(\omega t) \quad u_3 = \hat{u}_3 \cdot \sin(3\omega t) \quad u_5 = \hat{u}_5 \cdot \sin(5\omega t) \quad \text{mit } \hat{u}_3 = \frac{\hat{u}_1}{3} \quad \text{und } \hat{u}_5 = \frac{\hat{u}_1}{5}$$

entsteht eine Spannung, die sich erkennbar einem Rechteck annähert.



Bei der Überlagerung unendlich vieler Spannungen mit jeweils steigender Frequenz und angepaßter Amplitude entstehen beliebige Kurvenformen. Die Berechnungsvorschrift für die Fourierkoeffizienten kann jedem mathematischen Tabellenbuch entnommen werden. Für die Beschreibung der Störaussendung von Geräten werden die ersten 40 Harmonischen benutzt, die Qualitätsbeschreibung der Netze erfolgt zur Zeit noch mit den ersten 50 Harmonischen. Nachfolgend eine Zusammenstellung der Berechnungsformeln für die Fourier Koeffizienten zur Beschreibung der Funktion $i(\omega t)$:

$$i(\omega t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} A_h \cdot \cos(h \cdot \omega t) + \sum_{h=1}^{\infty} B_h \cdot \sin(h \cdot \omega t)$$

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega t=0}^{2\pi} i(\omega t) \cdot d\omega t \quad A_h = \frac{1}{\pi} \int_{\omega t=0}^{2\pi} i(\omega t) \cdot \cos(h \cdot \omega t) d\omega t$$

$$B_h = \frac{1}{\pi} \int_{\omega t=0}^{2\pi} i(\omega t) \cdot \sin(h \cdot \omega t) d\omega t$$

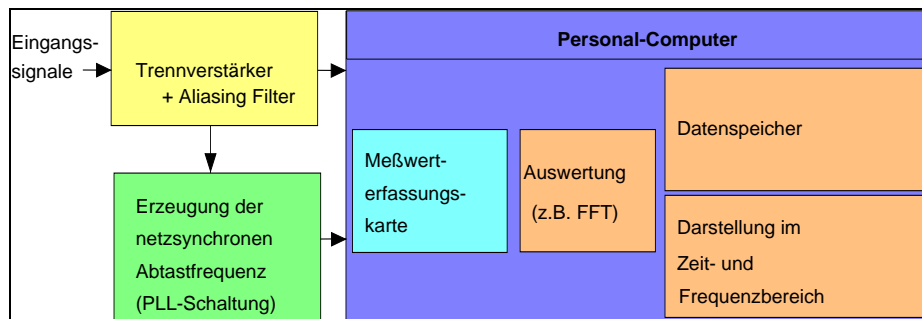
nach Betrag und Phase :

$$C_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \quad \varphi_h = \arctan\left(\frac{A_h}{B_h}\right)$$

Bei Berücksichtigung von Symmetriebedingungen kann die Berechnung der Koeffizienten wesentlich vereinfacht werden.

Meßtechnisch werden Spannungs- oder Stromsignale über eine bestimmte Fensterbreite (typisch 8 bis 16 Perioden) erfaßt und mit 256, 512 oder 1024 (jeweils 2^n ; $n = 8, 9$ oder 10) Stützstellen digitalisiert. Dafür wird im vereinfachten Verfahren die Fourieranalyse als FFT (Fast Fourier Transformation) durchgeführt. Wichtig ist die exakte Synchronisation der Abtastfrequenz mit der Grundfrequenz, die mit dem Einsatz spezieller PLL-Schaltungen (Phase lock loop) erreicht wird. Werden zehn Perioden eingelesen, können Zwischenharmonische mit 50 Hz/10 aufgelöst werden. Im europäischen Bereich bildet die EN 61000-4-7 den Standard für die Prüf- und Messverfahren für die Erfassung von Oberschwingungen. Im Wesentlichen werden die Kenngrößen definiert, die Messeinrichtungen mit

Strom- und Spannungseingangskreis beschrieben und Genauigkeitsanforderungen aufgelistet. Zusammengefasst kann festgestellt werden: Das zu analysierende analoge Signal wird innerhalb eines definierten Zeitfensters abgetastet, A/D-gewandelt und gespeichert. Die Fensterbreite bestimmt die auflösbaren Frequenzschritte. Um reproduzierbare Genauigkeiten zu erreichen, müssen Abtastfrequenz und Fensterbreite bestimmte Bedingungen erfüllen.



Oberschwingungsmesssystem mit Aliasing-Filter

Als **harmonische** Oberschwingungen werden alle ganzzahligen Vielfache der Grungschwingung bezeichnet. Bei unsymmetrischen Verzerrungen treten auch nicht ganzzahlige Vielfache als Ordnungszahlen auf; die dann als **zwischenharmonische Frequenzen** definiert werden.

Abb. 1.2 vergleicht die Verträglichkeitspegel der EN 61000-2-2 mit denen der EN 50160 und stellt die synthetische Spannungskurve mit den entsprechenden Oberschwingungsanteilen dar.

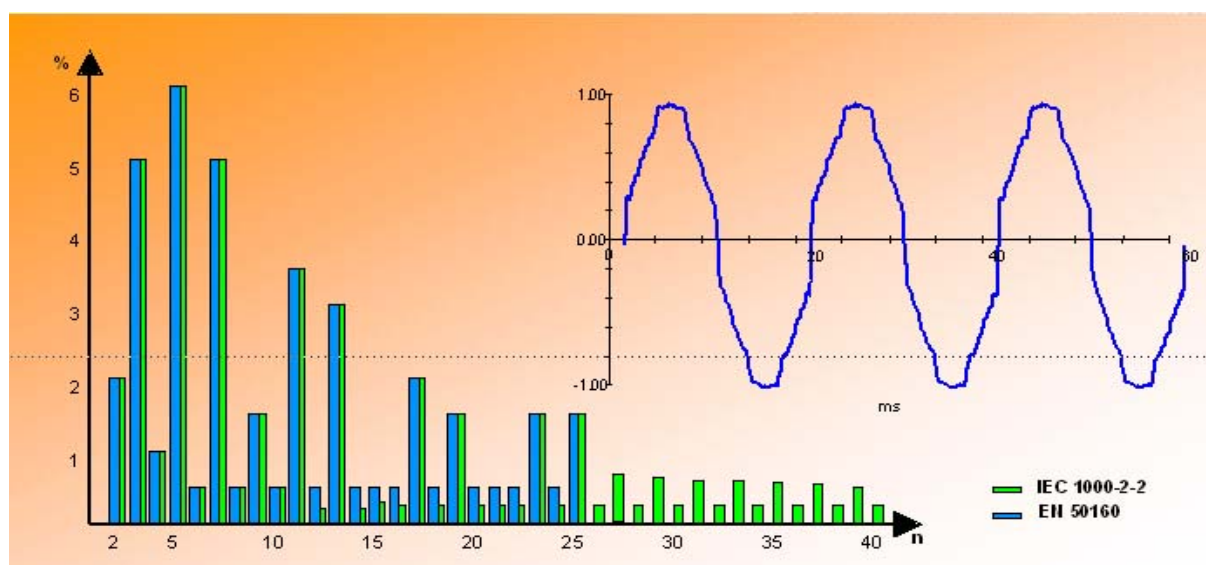


Abb. 1.2 Vergleich der Verträglichkeitspegel der Spannungsüberschwingungen nach EN 61000-2-2 und EN 50160 mit Darstellung der entsprechenden Kurvenform¹

Bei zwischenharmonischen Frequenzanteilen darf der Oberschwingungsspannungsanteil bis zu 0,2 % betragen. Da die Qualität der elektrischen Energieversorgung durch die Elektrizitätswerke und Energieversorgungsunternehmen garantiert wird, ist es naheliegend, daß diese Unternehmen auch eigene Standards und Richtlinien definieren.

¹ aus Siemens Power Engineering Guide · Transmission and Distribution · 4th Edition

In Verbindung mit dem Thema Netzrückwirkungen in industrieelektronischen Schaltungen spielt der Leistungsfaktor (power factor) eine besondere Rolle. Im folgenden werden kurz die theoretischen Grundlagen der Leistungsbeschreibung bei nicht sinusförmigen Größen zusammengefaßt.

Der Leistungsfaktor ist definiert als Verhältnis von Wirkleistung zu Scheinleistung:

Leistungsfaktor λ $\lambda = P/S$

Allgemein ergibt das Produkt einer zeitlich veränderlichen Spannung $u(t)$ und eines zeitlich veränderlichen Stromes $i(t)$ eine zeitlich veränderliche Leistung $s(t)$.

Leistung allgemein: $s(t) = u(t) \cdot i(t)$

Als Wirkleistung P wird der arithmetische Mittelwert dieser Leistungsfunktion benannt:

Wirkleistung $P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T s(t) dt$

Die Scheinleistung (S) ist dabei der Spitzenwert der Leistungsfunktion und entspricht dem Produkt von Gesamtspannungseffektivwert (U) mit Gesamtstromeffektivwert (I).

Scheinleistung $S = U I$

Bei **sinusförmigem** Strom- und Spannungsverlauf und unter Berücksichtigung einer Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung errechnen sich Wirkleistung und Leistungsfaktor wie folgt:

Wirkleistung $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$; Leistungsfaktor $\lambda = \cos \varphi$

Bei überschwingungsbehaftetem Strom und einer sinusförmigen Spannung mit der Phasenverschiebung φ_1 zum Grundschwingungsstrom lassen sich weitere Definitionen treffen. Die Grundschwingungs- oder Steuerblindleistung Q_1 ergibt sich:

Steuerblindleistung $Q_1 = U \cdot I_1 \sin \varphi_1$

Das Produkt der Spannung mit allen Oberschwingungsströmen bildet dann die Verzerrungsblindleistung D:

Verzerrungsblindleistung $D = U \cdot \sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} I_v^2}$

Die Wirkleistung wird nur aus den Strom- und Spannungsanteilen gleicher Frequenz gebildet, in diesem Fall nur mit der Stromgrundschwingung:

Wirkleistung $P = U \cdot I_1 \cos \varphi_1$; Leistungsfaktor $\lambda = \frac{U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{U \cdot I}$

Das Verhältnis von Stromgrundschwingungseffektivwert zu Gesamtstromeffektivwert wird als Stromgrundschwingungsgehalt g_i bezeichnet.

Stromgrundschwingungsgehalt (fundamental factor): $g_i = \frac{I_1}{I}$

Als Klirrfaktor bezeichnet man das Verhältnis Gesamteffektivwert aller Stromüberschwingungen zum Gesamtstrom.

Klirrfaktor (total harmonic factor) $k = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} I_v^2}}{I}$

Danach gilt der Zusammenhang:

$$g_i^2 + k^2 = 1$$

Oft findet sich auch der Verzerrungsfaktor THD (total harmonic distortion):

Verzerrungsfaktor für die Spannung:
$$\text{THD}_u = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} U_v^2}}{U_1}$$

und für den Strom:
$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} I_v^2}}{I_1}$$

partiell gewichteter Verzerrungsfaktor (partial weighted harmonic distortion)
$$\text{PHD} = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} n \cdot \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2}$$

gesamter Oberschwingungsstrom (total harmonic current)
$$\text{THC} = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}$$

Teilstrom der ungeradzahligen OS (partial odd harmonic current)
$$\text{PHC} = \sqrt{\sum_{n=21,23}^{39} I_n^2}$$

Nach diesen theoretischen Aussagen wird ersichtlich, daß sich der Leistungsfaktor mit fortschreitender Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung und mit zunehmender Verzerrung der Stromkurve verschlechtert. Die Forderung nach einem Leistungsfaktor nahe 1 bedeutet somit für einen Verbraucher, möglichst sinusförmigen Strom in Phase zur Spannung aufzunehmen.

Üblicherweise werden Stromrichterschaltungen (z.B. in der Antriebstechnik) idealisiert so betrachtet, daß ausgangsseitig ein glatter Gleichstrom fließt (Glättungsinduktivität gegen ∞); netzseitig ergeben sich dementsprechend rechteckförmige Stromblöcke. Mathematisch läßt sich für einen solchen Stromverlauf mit Hilfe der Harmonischen Analyse oder Fouriertransformation das Oberschwingungsspektrum berechnen.

Es ergeben sich dafür Ordnungszahlen der Strom Oberschwingungen bei netzgeführten Stromrichtern zu:

$$v = k \cdot p \pm 1 \quad (\text{statt } v \text{ auch } h \text{ oder } n)$$

mit $k = 0, 1, 2, \dots$ jede ganze Zahl und $p =$ Pulszahl des Stromrichters.

Die Effektivwerte der Oberschwingungsströme werden proportional $1/v$ kleiner.

Effektivwerte der Oberschwingungsströme:
$$I_v = \frac{I_1}{v}$$

I_1 ist die Stromgrundschiwingung.

Die Auswirkungen der Strom Oberschwingungen und deren Richtungsbestimmung werden an anderer Stelle noch behandelt.