

Netzanalyse, Oberschwingungen in elektrotechnischen Anlagen

Gefährdungen • Ursachen • Auswirkungen

1 Rechtsgrundlagen	1
1.1 Verantwortung und Pflichten des Betreibers elektrischer Anlagen und Betriebsmittel	1
1.2 Produktsicherheitsgesetz	14
1.3 Verordnungen	14
1.4 Bedeutung von CE-Kennzeichnung und GS-Zeichen auf Produkten	20
2 Gefahren des elektrischen Stroms	1
2.1 Wirkungen des Stroms auf den Menschen	1
2.2 Gefährdungsgrenzen in Abhängigkeit von der Frequenz	16
3 Netzsysteme (Niederspannung < 1kV)	1
3.1 Kennzeichnung der Netzsysteme	1
3.2 TN-Netzsystem	2
3.3 TT-Netzsystem	4
3.4 IT-Netzsystem	4
3.5 Symptome in den Netzsystemen	7
4 Schutzmaßnahmen – Schutz gegen elektrischen Schlag	1
4.1 Allgemeines	1
4.2 Maßnahmen zum Schutz gegen elektrischen Schlag nach DIN VDE 0100-410	7
4.3 Berührungsspannung in fehlerbehafteten Netzsystemen	43
5 Wechselstrom- und Oberschwingungsmesstechnik	1
5.1 Arithmetischer Mittelwert (Gleichwert)	1
5.2 Gleichrichtwert	2
5.3 Quadratischer Mittelwert (Effektivwert RMS) Effektivwert einer sinusförmigen Wechselgröße	3
5.4 Echt-Effektivwert (TRMS) Echt-Effektivwert einer Wechselgröße beliebiger Kurvenform	5
5.5 Analoge Messwerktechnik	7
5.6 Strommesszangen	9
5.7 Oberschwingungsmesstechnik	11
6 Ursachen und Auswirkungen von Oberschwingungen	1
6.1 Störungen in den Stromversorgungsnetzen	1
6.2 Analyse und Synthese von Oberschwingungen	7
6.3 Kennwerte im Zusammenhang mit Oberschwingungen	14
6.4 Auswirkungen von Oberschwingungen	20
6.5 Phasenanschnittsteuerung (Dimmer)	30
6.6 Leuchtmittel	31
6.7 Netzteile	33
6.8 Elektronisch geregelte Bohrmaschine	34
6.9 Ladestationen von Elektrofahrzeugen	35
6.10 PV-Wechselrichter	35

6.11 Schutz des Netzsystems bei Oberschwingungen	39
6.12 Power Quality	42
6.13 Merksätze	48
7 Frequenzumrichter	1
7.1 Frequenzumrichter und Oberschwingungen	1
7.2 Ableit- und Fehlerströme in Stromkreisen mit Frequenzumrichtern.....	11
8 Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (Residual Current Device).....	1
8.1 Grundlagen	1
8.2 Funktionsprinzip	4
8.3 Koordination von Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen	17
8.4 Überlastschutz von RCD	25
8.5 Grenzen der Schutzwirkung von Fehlerstromschutzschaltern.....	25
8.6 Einsatzgebiete	27
8.7 RCD-Ausführungen	28

6 Ursachen und Auswirkungen von Oberschwingungen

Die Oberschwingungsbelastung von Stromversorgungsinfrastrukturen samt ihrer elektrischen und elektronischen Verbraucher ist in den vergangenen Jahren drastisch gestiegen. Es gibt messtechnisch nachweisbare Auswirkungen: Je mehr Leistungselektronik zum Einsatz kommt, desto höher die Spannungsverzerrung. In einer Stromversorgung würde im Idealfall überall eine perfekte sinusförmige Spannung vorliegen. In der Realität jedoch ist es nahezu unmöglich, derartige Verhältnisse zu erreichen. In der Praxis sind mehr und mehr nichtlineare Verbraucher anzutreffen, die nichtsinusförmige Ströme aus dem Netz entnehmen. Andererseits ist für einen zuverlässigen und effizienten Betrieb aller Geräte eine sehr hohe Netzqualität (Power Quality) unabdingbar.

6.1 Störungen in den Stromversorgungsnetzen

Oberschwingungen werden von nichtlinearen Verbrauchern verursacht. Eine Last gilt als nichtlinear, wenn der von der Last aufgenommene Strom nicht sinusförmig ist, auch wenn er mit einer Sinusspannung versorgt wird. Durch den Anstieg nichtlinearer Verbraucher hat sich der Oberschwingungsanteil im Versorgungsnetz massiv erhöht. Diese Komponenten werden unter anderem in Gleichstromversorgungen (Netzteilen), Computern, elektronischen Vorschaltgeräten und Dimmern sowie in Stromrichtern und Frequenzumrichtern in Motorantrieben mit regelbarer Drehzahl verbaut. Die moderne Elektronik arbeitet mit konstanter Gleichspannung. Dazu muss der eingehende Wechselstrom über einen Brückengleichrichter gleichgerichtet und mittels Glättungskondensator ausgeglättet werden. Die Stromaufnahme erfolgt aufgrund der stoßartigen Aufladung des Glättungskondensators hinter dem Gleichrichter pulsartig. Durch die stoßartige Artladung wird der Strom in seiner Form verzerrt, was gleichbedeutend mit Oberschwingungen ist. Die Folge ist, dass der Verbraucherstrom dem Netz nicht mehr sinusförmig entnommen wird. Die Form von Spannung und Strom weicht heute deutlich von einer Sinusfunktion ab. Die verzerrten Schwingungsformen werden als Oberschwingungsbehaftet bezeichnet. Ungerade Oberschwingungen sind die charakteristischen Oberschwingungsanteile in den heutigen Stromversorgungsnetzen. Sie stellen Wellenformen dar, die bezogen auf die Zeitachse symmetrisch sind. Aufgrund der meist dreiphasigen Symmetrie der heutigen Netzinfrastrukturen sind nahezu alle Signale symmetrisch, obwohl es zu einer Verzerrung kommt.

Wie sich Oberschwingungsströme in einem Stromversorgungssystem verbreiten und welche Spannungsverzerrungen die Folge sind, hängt von den Eigenschaften der Oberschwingungserzeuger sowie den Eigenschaften aller Geräte ab, die an das elektrische Netz angeschlossen sind, welches analysiert werden soll. Die Auswirkungen von Impedanzen sind relativ schnell erklärt. Wenn nichtlineare Ströme durch ein elektrisches System und Übertragungsleitungen fließen, erzeugen die Impedanzen zusätzliche Spannungsabfälle. Dieser Zusammenhang ist als ohmsches Gesetz ($U=Z \cdot I$) bekannt. Die Addition der Oberschwingungsströme einzelner Geräte ist komplexer, da die Gesamt-Oberschwingungsverzerrung des Stroms auch von der Phasenverschiebung zwischen den unterschiedlichen Strömen gleicher Frequenz beeinflusst wird. Diese Phasenverschiebung kann bei nahezu 0° oder nahe 180° liegen und das Additionsergebnis massiv beeinflussen.

Der nichtlineare Strom enthält Frequenzkomponenten, die ein Vielfaches der Frequenz des Stromversorgungssystems sind. Diese Oberschwingungsströme wirken mit der Impedanz im Stromversorgungssystem zusammen und erzeugen eine Spannungsverzerrung, die Auswirkungen auf das Stromversorgungssystem und die damit verbundenen Lasten haben kann.

6.1.1.2 Schwingungsartige Transienten

Eine schwingungsartige Transiente ist eine plötzliche oszillierende Änderung einer Signalspannung bis in den Kilovolt-Spannungsbereich hinein. Sie klingen normalerweise innerhalb einer Periode (20ms) auf den Wert Null ab.

Solche Transienten treten auf, wenn Induktionslasten (Elektromotor) oder kapazitive Lasten (Kondensatorbatterie) abgeschaltet werden. Dabei entsteht ein schwingungsartiger Spannungsstoß.

Ebenfalls kann ein weit ausgedehntes Stromverteilungssystem beim Ein- oder Ausschalten wie ein Oszillator wirken, da alle Stromkreise eine Eigeninduktivität und eine verteilte Kapazität aufweisen. Als Maßnahme wird die Installation von Strombegrenzungsdrosseln oder Leitungsdrosseln empfohlen.

Werden Frequenzumrichter geschaltet, so können auch Transienten mit schwingungsartigem Verlauf in der der Spannung auftreten.

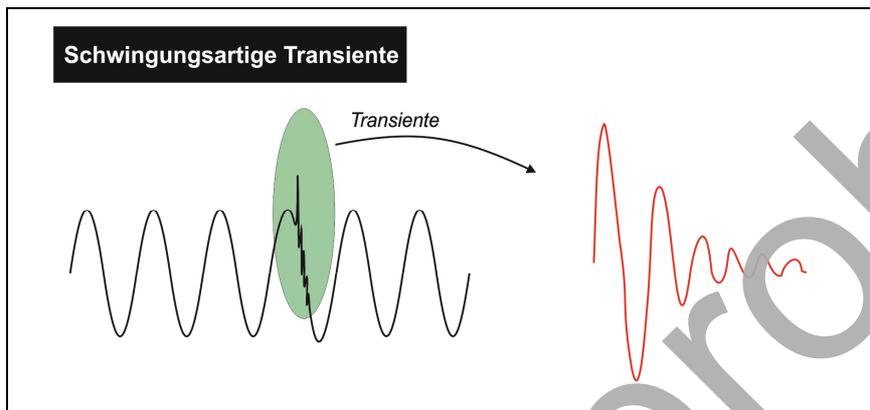


Bild 3: Schwingungsartige Transienten

6.1.2 Spannungsunterbrechung, Spannungseinbruch, Unter- und Überspannung

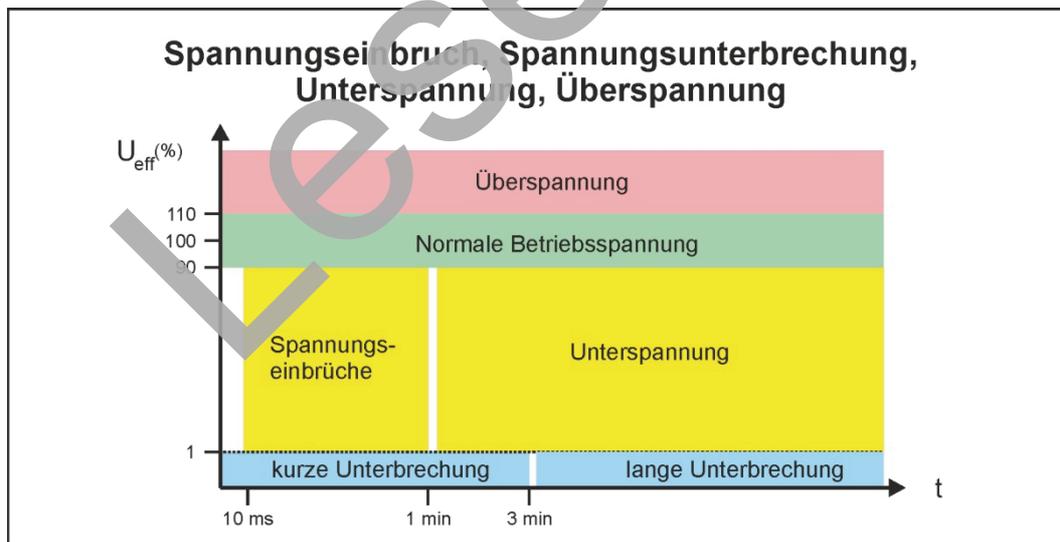


Bild 4: Spannungsunterbrechung, Spannungseinbruch und Unter-spannung

6.1.2.1 Spannungsunterbrechung

Bei einer Unterbrechung fällt die Spannung weit unter ihren Nennwert ab. In 3-Phasensystemen beginnt die Unterbrechung, wenn die Spannung an allen Phasen unter den Schwellenwert sinkt, und endet, wenn eine Phase gleich oder größer als der für Unterbrechungen definierte Schwellenwert

Geräten führen. Als bekannte Gegenmaßnahme in sensiblen Stromversorgungsbereichen wie Rechenzentren werden unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV) eingesetzt.

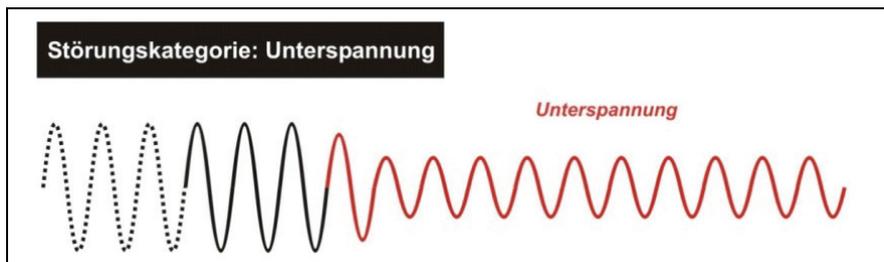


Bild 7: Störungskategorie: Unterspannung

6.1.3 Spannungsanstieg/Überspannung

Überspannungen treten nur für den Bruchteil einer Sekunde auf. Man nennt sie deshalb auch transiente Spannungen oder kurz Transienten. Sie haben sehr kurze Anstiegszeiten von wenigen Mikrosekunden, bevor sie dann vergleichsweise langsam über einen zeitlichen Bereich von bis zu 100 Mikrosekunden wieder abfallen.

Überspannungen entstehen durch folgende Ereignisse:

Blitzentladungen

Der Fachausdruck für eine Blitzentladung ist **LEMP**. Das steht für Lightning Electromagnetic Pulse. Blitzschläge bei einem Gewitter verursachen extrem hohe transiente Überspannungen. Diese liegen weit höher als solche, die durch Schalthandlungen oder elektrostatische Entladungen entstehen. Jedoch treten sie im Vergleich zu anderen Entstehungsursachen wesentlich seltener auf.

Schalthandlungen

Schalthandlungen werden mit der Abkürzung **SEMP** bezeichnet. Dieser Ausdruck steht für Switching Electromagnetic Pulse. Unter Schalthandlungen versteht man in diesem Zusammenhang das Schalten leistungsstarker Maschinen oder Kurzschlüsse im Stromversorgungsnetz. Bei solchen Vorgängen entstehen in den betroffenen Leitungen in wenigen Sekundenbruchteilen sehr hohe Stromänderungen.

Elektrostatische Entladungen

Die Abkürzung **ESD** steht für Electrostatic Discharge und bezeichnet eine elektrostatische Entladung. Hier findet bei einer Annäherung oder Berührung von Körpern mit unterschiedlichem elektrostatischem Potential eine Übertragung elektrischer Ladung statt.

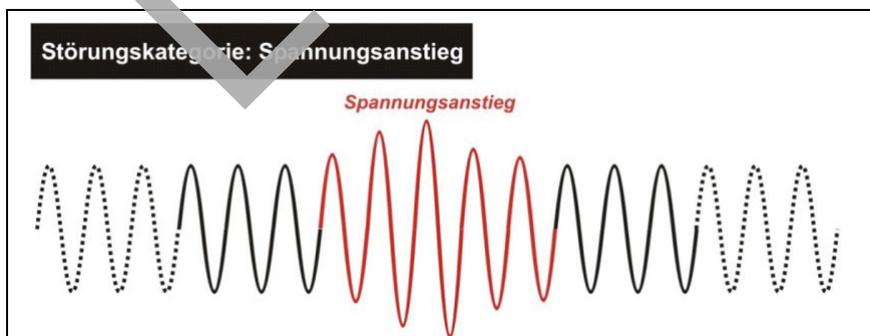


Bild 8: Spannungsanstieg

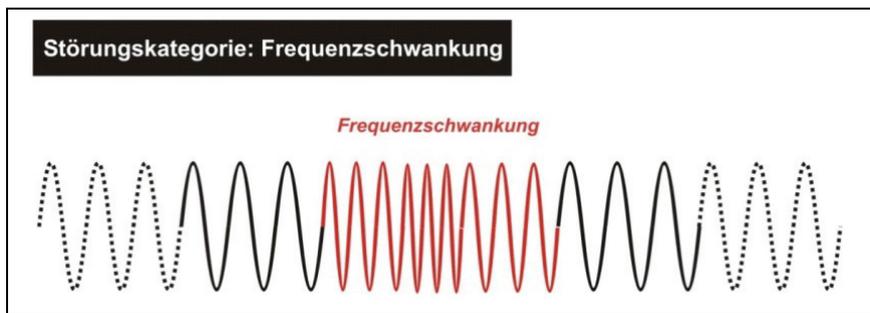


Bild 11: Störungskategorie: Frequenzschwankungen

6.1.6 Verzerrung der Wellenform

Zu den Verzerrungen der Wellenform sind im Wesentlichen zu nennen: Gleichstrom-Versatz, Rauschen und Oberschwingungen.

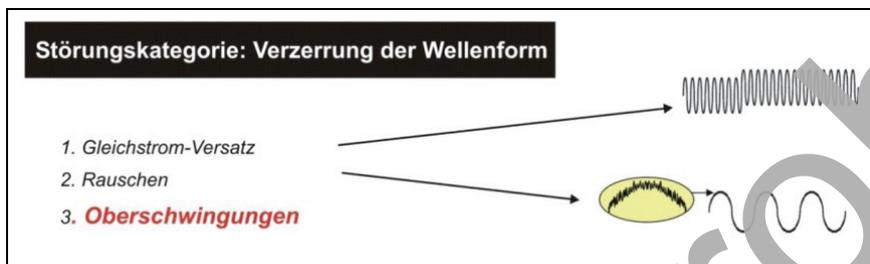


Bild 12: Störungskategorie: Verzerrung der Wellenform

6.2 Analyse und Synthese von Oberschwingungen

Wie bereits unter zuvor ausgeführt, hat sich durch den Anstieg nichtlinearer Verbraucher der Oberschwingungsanteil im Versorgungsnetz massiv erhöht. Die Form von Spannung und Strom weicht deutlich von einer Sinusfunktion ab. Die verzerrten Schwingungsformen werden als Oberschwingungsbehaftet bezeichnet. Insbesondere Strommessungen sind korrekt nur mit TRMS-Messgeräten zu erfassen. (siehe Abschnitt Wechselstrom- und Oberschwingungsmesstechnik).

An dieser Stelle werden die Details dieser nicht-sinusförmigen, aber dennoch periodischen Signalverläufe von Strom und Spannung in den Niederspannungsstromversorgungsnetzen behandelt.

Oberschwingungen

Der Mathematiker Jean-Baptiste Fourier hat 1822 mathematisch nachgewiesen, dass jede beliebige periodische Signalform (z.B. ein verzerrter AC-Stromverlauf) in eine Summe rein sinusförmiger Schwingungen zerlegt werden kann, zuzüglich eines eventuell vorhandenen DC-Anteils. Diese Zerlegung einer beliebigen periodischen Signalform in Grundschwingung und Oberschwingungen erfolgt durch das nach ihm benannte Verfahren, der Fourier-Analyse. Die schnelle Fourier-Transformation (FFT- Fast Fourier Transformation) ist ein Algorithmus zur effizienten Berechnung der diskreten Fourier-Transformation.

Fourier, Jean-Baptiste, Frankreich (1768-1830): „Jeder nicht sinusförmige periodische Vorgang lässt sich durch die Summe rein sinusförmiger Vorgänge unterschiedlicher Frequenz und Amplitude darstellen. Bei manchen Systemen ist zusätzlich die Addition einer Konstanten erforderlich.“

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n \cdot \omega t) + b_n \sin(n \cdot \omega t)]$$

150Hz. Die ungeraden Oberschwingungen niedriger Ordnung (3, 5, 7, ...) erzeugen meist die größten Verzerrungen des Ausgangssignals.

Bei der Überlagerung unendlich vieler Sinuskurven mit jeweils steigender Frequenz und angepasster Amplitude entstehen beliebige Kurvenformen. Im Rahmen der Fourier-Synthese (dem Gegenteil zur Fourier-Analyse) kann die Berechnungsvorschrift der Fourierkoeffizienten für die jeweiligen Amplituden der Einzelschwingungen mathematischen Tabellenbüchern entnommen werden. In der messtechnischen Praxis werden für die Beschreibung der Störaussendung von Geräten die ersten 40 Harmonischen (2 kHz) benutzt, die Qualitätsbeschreibung der Stromversorgungsnetze erfolgt mit den ersten 50 Harmonischen (2,5 kHz). Einzelne Messgeräte analysieren auch weit darüber hinaus.

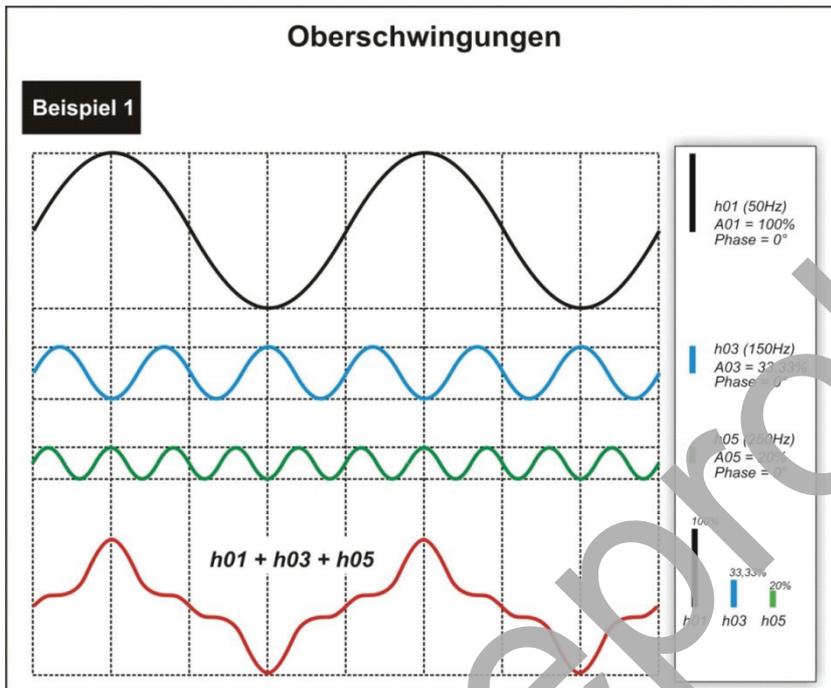


Bild 13: Beispiel 1 für eine Fourier-Synthese

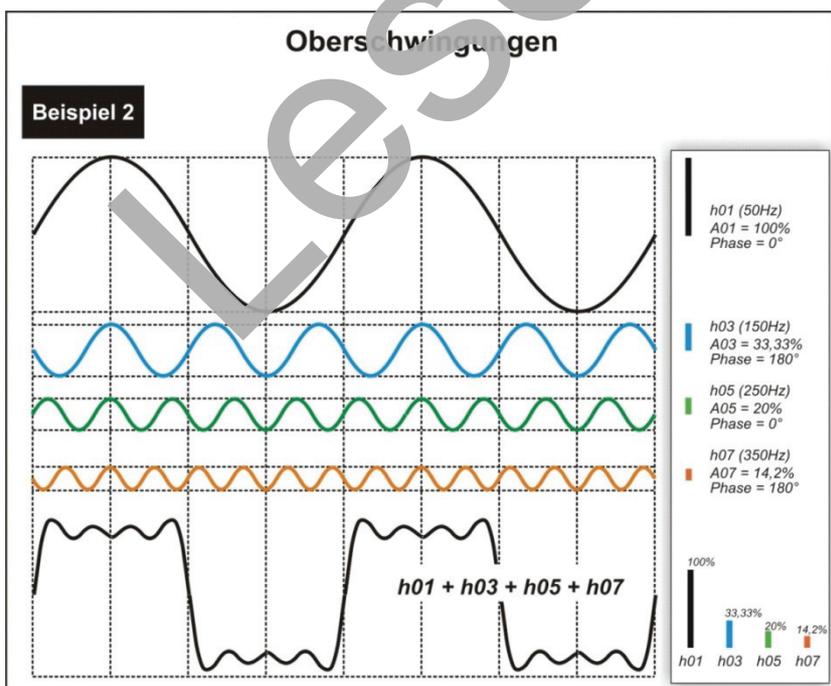


Bild 14: Beispiel 2 für eine Fourier-Synthese

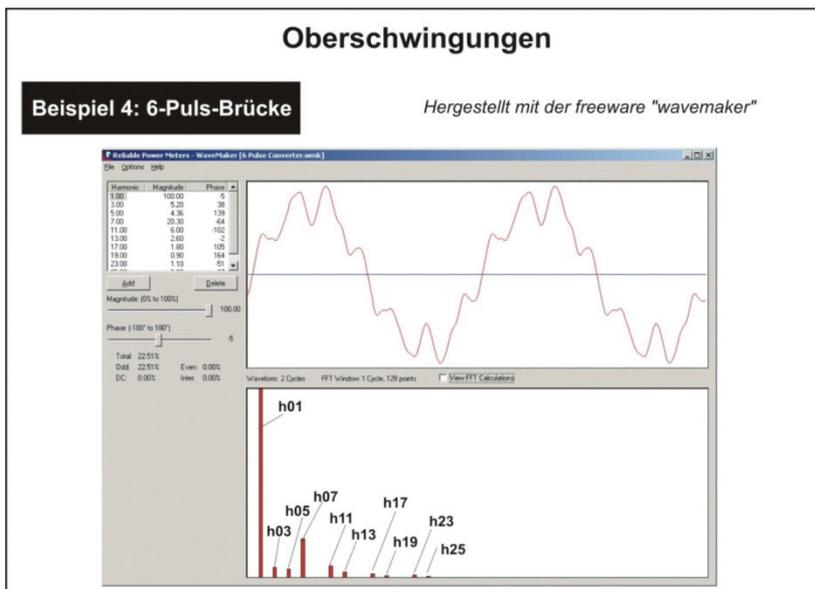


Bild 16: Beispiel 4 für eine Fourier-Synthese

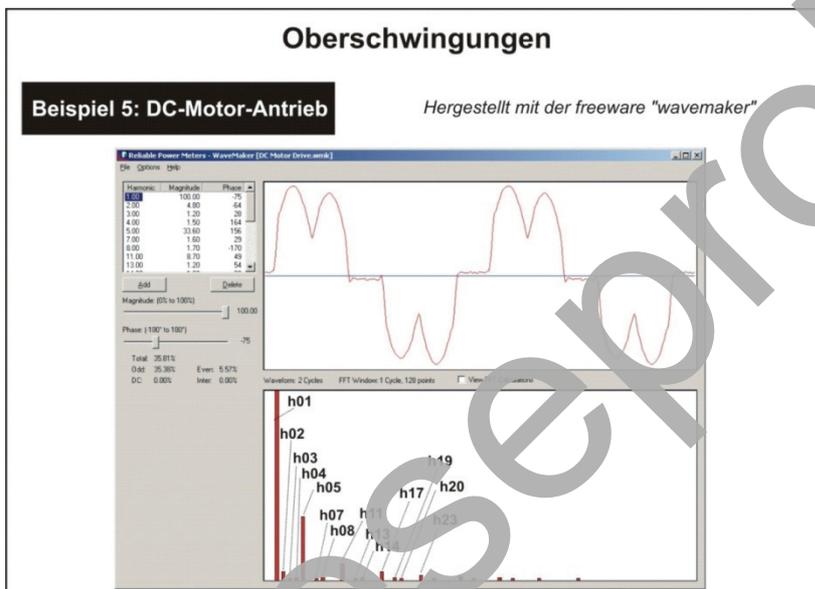


Bild 17: Beispiel 5 für eine Fourier-Synthese

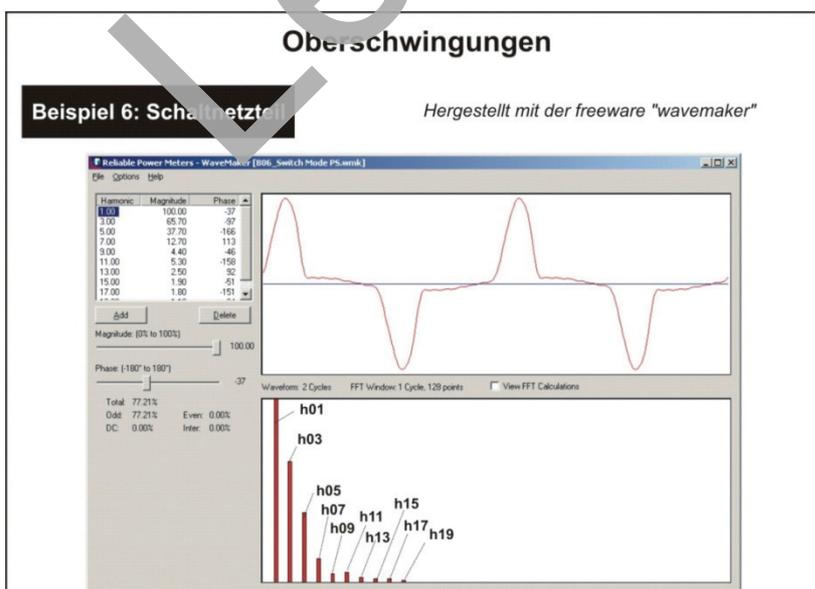


Bild 18: Beispiel 6 für eine Fourier-Synthese

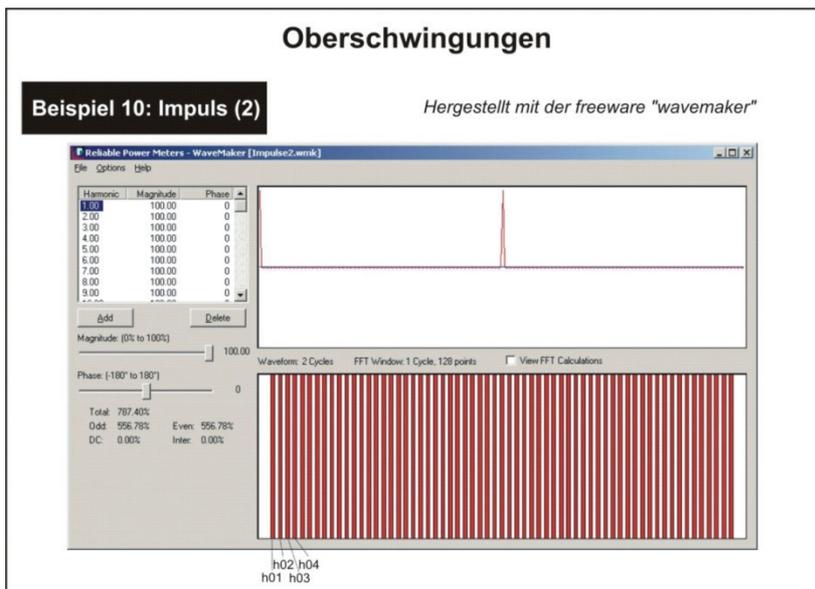


Bild 22: Beispiel 10 für eine Fourier-Synthese

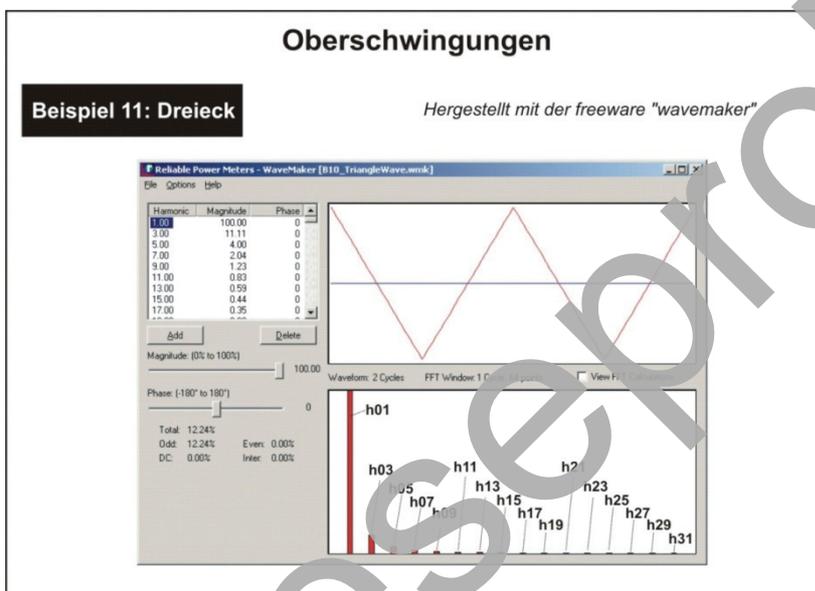


Bild 23: Beispiel 11 für eine Fourier-Synthese

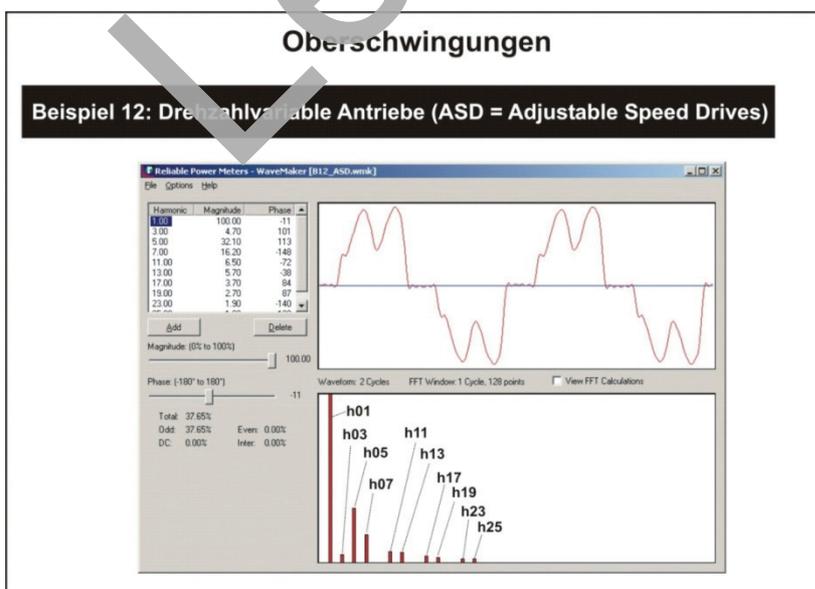


Bild 24: Beispiel 12 für eine Fourier-Synthese

PHC (Partial Harmonic Current)

Teilstrom der ungeradzahligen Oberschwingungen (partial odd harmonic current)

$$\text{PHC} = \sqrt{I_{21}^2 + I_{23}^2 + \dots + I_{39}^2} = \sqrt{\sum_{n=21,23}^{39} I_n^2}$$

DF (Distortion Factor)

Verzerrungsfaktor. Oberschwingungsklirrfaktor.

$$\text{DF} = \frac{\sqrt{A_0^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_{\text{eff}}}$$

Beispiel: DF = 40% bedeutet, dass 40% des Effektivwertes in höherfrequenten Oberschwingungen vorliegen.

Grundschwingungsgehalt g

Quotient des Effektivwertes der Grundschwingung zum Gesamteffektivwert der Oberschwingungen.

$$g = \frac{A_1}{A_{\text{eff}}}$$

Stromgrundschwingungsgehalt g_i

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

Stromgrundschwingungsgehalt (fundamental factor) g_i:

$$g = \frac{I_1}{I_{\text{eff}}}$$

6.3.2 Klirrfaktor k

Der Klirrfaktor k ist nicht identisch mit dem THD-Wert. Der Klirrfaktor bezieht sich auf das Gesamtsignal des Effektivwertes und nicht allein auf die Grundschwingung. Er ist also maximal 100%

$$k = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}} = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_{\text{ges}}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} A_n^2}}{A_{\text{ges}}} \leq 100\%$$

Legende:

A₀ = Effektivwert des DC-Anteils / A₁ = Effektivwert der Grundschwingung

A_n = Effektivwert der n-ten Oberschwingung / A_{eff} = Effektivwert des Gesamtsignals

I₀ = Effektivwert des DC-Stromanteils / I₁ = Effektivwert der Stromgrundschwingung

I_n = Effektivwert der n-ten Stromoberschwingung / I_{eff} = Effektivwert des Stromgesamtsignals

U₀ = Effektivwert des DC-Spannungsanteils / U₁ = Effektivwert der Spannungsgrundschwingung

U_n = Effektivwert der n-ten Spannungsoberschwingung / U_{eff} = Effektivwert des Spannungsgesamtsignals