Netzqualität in Verteilnetzen

1 Einleitung

1.1 Netzbelastung durch lineare Lasten

An einem Wirkwiderstand erzeugt eine sinusförmige Spannung einen Strom mit sinusförmigem Verlauf, welcher zur Spannung proportional ist. Das Produkt aus Spannung und Strom wird als Wirkleistung bezeichnet, die stets aus der Grundschwingung entnommen wird.

Bei induktiver Last ist der Augenblickswert der Spannung proportional zur Änderungsgeschwindigkeit des Stromes di/dt. Bei einer Induktivität eilt die Spannung dem Strom um 90° voraus.

Bei kapazitiver Last ist der Augenblickswert des Stromes proportional zur Änderungsgeschwindigkeit der Spannung du/dt. Bei einer Kapazität eilt der Strom der Spannung um 90° voraus.

Mathematisch entspricht die Ableitung einer Sinusfunktion der Cosinusfunktion.

$$\frac{d}{dx}\sin(x) = \cos(x)$$

Aus diesem Grunde erzeugt die Änderungsgeschwindigkeit einer sinusförmigen Spannung in der Last einen cosinusförmigen Strom (Abb. 1-1), welcher der Spannung vorauseilt.

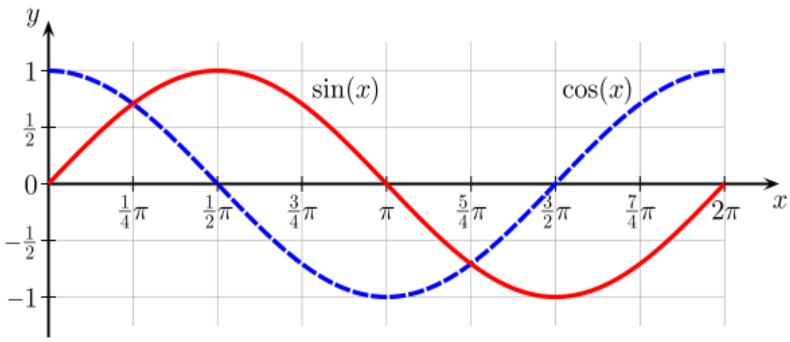


Abb. 1: Sinus- und Kosinusfunktion im Linendiagramm[1]

Beide Funktionen sind 2π-periodisch und lassen sich aus Zeigern im Einheitskreis konstruieren.

Bekannt sind z.B. folgende Netzstörungen:

- Langsame Spannungsänderungen (10 min)
- Schnelle Spannungsänderungen (10 ms)
- Temporäre Spannungserhöhungen
- Stosswellen durch hohe Einschaltströme
- Frequenzschwankungen durch Laständerungen
- Transienten durch Überspannungen und induktive Verbraucher

[1] Bildquelle: Wikipedia.

1.2 Netzbelastung durch nichtlineare Lasten

Ausser dem beschriebenen und als klassisch zu bezeichnenden Phänomen phasenverschobener Wechselgrössen treten in modernen Energieverteilnetzen zahlreiche Effekte auf, die zu einer Verschlechterung der Netzqualität beitragen.

Bekannt sind z.B. folgende Störeinflüsse:

- Kurzzeitige Spannungseinbrüche durch Kommutierungsvorgänge
- Flicker (schnelle Spannungsschwankungen) durch Schaltvorgänge
- Oberschwingungen

1.3 Oberschwingungen in Starkstromnetzen

Eine nicht geringe Problematik entsteht durch Oberschwingungen. Bekanntlich lässt sich ein beliebig oft differenzierbares Signal in eine Summe von Sinus- und Cosinusanteilen zerlegen, deren Amplitude mit der Frequenz abnimmt. Man spricht hier von Fourieranalyse. Gegenteil ist die Fouriersynthese. Als erste Harmonische bezeichnet man die Grundschwingung, welche im Kontext mit dem Netzsinus von 50 Hz identisch ist. Als zweite, dritte, fünfte oder n-te Harmonische bezeichnet man ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung.

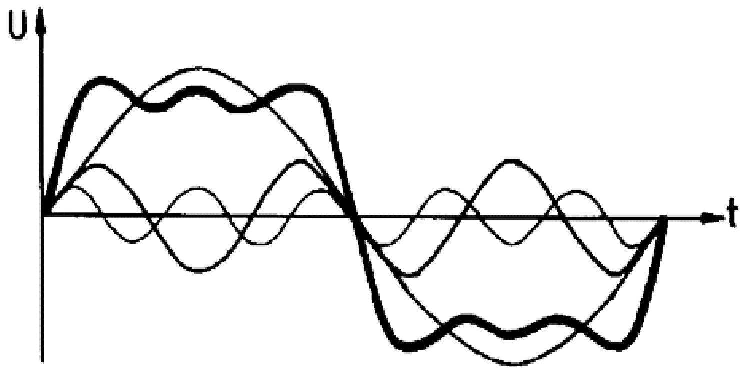


Abb. 2: Resultierende Schwingung

(bestehend aus Grundschwingung, dritter und fünfter Harmonischer)

Stromoberschwingungen (wie solche z.B. bei Phasenanschnittschaltungen vorkommen) bewirken über die Netzimpedanz messbare Spannungsoberschwingungen. Ist bei einer Vergleichsmessung mit einem Drehspuhlinstrument und einem True-RMS-Digitalmessgerät eine signifikante Spannungsdifferenz vorhanden, so ist mit Oberschwingungen zu rechnen. Eine Versuchsschaltung mit Dimmer und Glühlampe lässt sich mit wenig Aufwand realisieren.

In elektrischen Verteilnetzen wirken sich besonders die ungeradzahligen Harmonischen – darunter die dritte und fünfte – störend aus.

Im folgenden Beispiel (Abb. 3) führt die Vektorsumme der 3. Harmonischen im Neutralleiter zu grossen Strömen, die das Netz unnötig belasten.

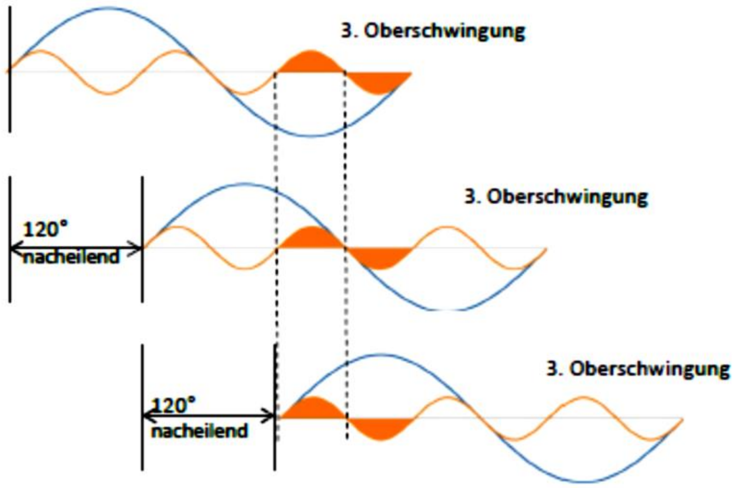
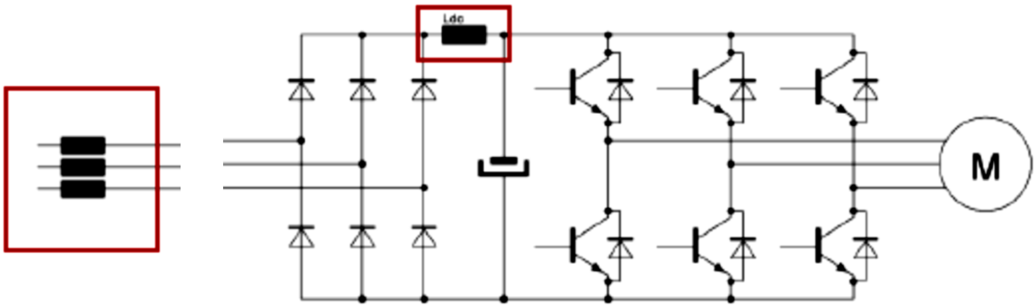


Abb. 3a: Dritte Harmonische in den Polleitern (meist unproblematisch)

Abb. 3b: Dritte Harmonische im Neutralleiter (oft problematisch)

Um Netzrückwirkungen zu minimieren, giebt es verschiedene Möglichkeiten, darunter:

- Netzdrosseln (AC Line Reactors)
- Zwischenkreisdrosseln (DC Link Chokes)
- Oberschwingungsfilter



a) Netzdrossel b) Zwischenkreisdrossel

Abb. 4: Oberschwingungskompensation bei einem Frequenzumrichter

Bei den Oberschwingungsfiltern gibt es passive und aktive.

a) Passive Oberschwingungsfilter (Tuned filter) bestehen typischerweise aus einer LC-Kombination (bestehend aus Spule und Kondensator), die auf einzelne Harmonische abgestimmt ist und als Sperr- oder Saugkreis eingesetzt werden kann.

b) Aktive Oberschwingungsfilter kommen dort zum Einsatz, wo wechselnde nichtlineare Lasten im Spiel sind. Die durch Oberschwingungen bewirkten Ströme werden dabei durch Kompensationsströme unterdrückt. Ferner können auch Blindleistungsanteile gezielt kompensiert werden.

2 Energie und Leistung

2.1 Wirk- und Scheinleistung

In einem einfachen System wird elektrische Energie von der Quelle zur Last übertragen. Die aufgenommene Energie wird anschliessend in eine andere Energieform umgewandelt (z.B. Licht, Wärme, Bewegung). Weil bei diesem Prozess Arbeit verrichtet wird, nennt man diese Energie auch Wirkenergie.

▶ Die **Wirkleistung** (Active Real Power) ist der periodische Mittelwert der Leistungsschwingung.

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T [u(t) \cdot i(t)]dt$$

Wirkleistung kann nur von gleichfrequenten Grössen erzeugt werden!

▶ Die **Scheinleistung** (Apparent Power) entspricht dem Produkt der Effektivwerte von Strom und Spannung. Effekte wir Phasenverschiebung oder Verzerrung der Signale sind in der Scheinleistung enthalten.

$$S = U_{trms} \cdot I_{trms}$$

Während die Wirkleistung eine physikalisch eindeutig interpretierbare Größe ist, dient die Scheinleistung zur korrekten Bemessung der Energieübertragungsmittel. Die geometrische Differenz zwischen Wirk- und Scheinleistung wird als Blindleistung bezeichnet.

2.2 Blindleistung

Blindleistung kann verschiedene Ursachen haben. Bei sinusförmigem Verlauf der Netzspannung ohne Oberschwingungen wird in Reaktanzen (Kondensatoren, Kabelabschirmungen, Motoren, Transformatoren etc.) infolge der dort existenten Phasenverschiebung sog. **Verschiebungsblindleistung** (Abb. 3-1b) erzeugt. In praxi überwiegt meist der induktive Blindenergieanteil.

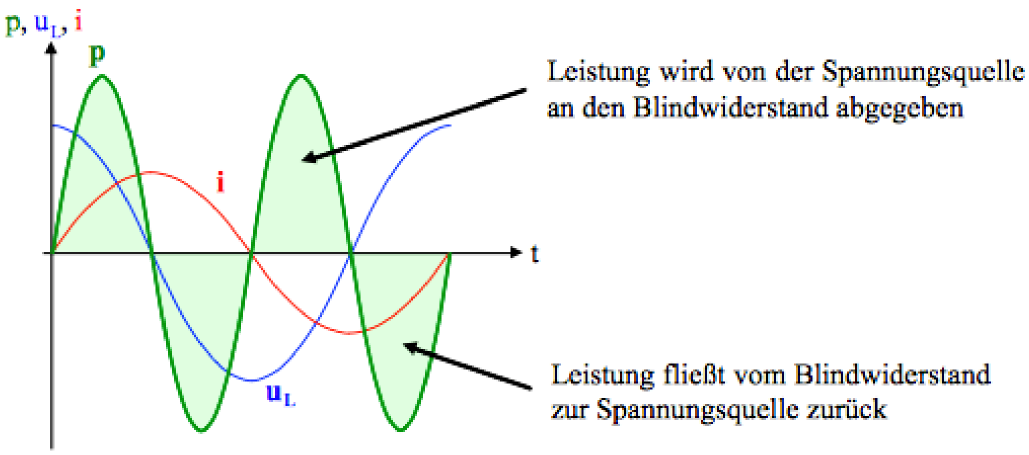


Abb. 5: Verschiebungsblindleistung (induktiv)[2]

[2] Bildquelle: http://elektronik-kurs.net/

Für die über eine Periode integrierte Blindleistung gilt:

$$\int_0^T p(t)dt = 0$$

Beispiel: Beim Anfahren eines Aufzuges wird Energie in den Motor übertragen. Dieser läuft eine bestimmte Zeit, um bei der Zieletage anzuhalten. Während der Bremsphase wirkt der Motor als Generator, um Energie ins Netz zurückzuspeisen (sog. Rekuperation). Die zwischen Quelle und Last pendelnde Energie heisst Blindenergie.

2.2.1 Verschiebungsblindleistung

In Netzen mit sinusförmigen Strömen bzw. linearen Verbrauchern entsteht Blindleistung als Folge einer Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. In der Fachliteratur ist von **Verschiebungsblindleistung** die Rede (Abb. 6b).

$$Q_{shift} = U \cdot I \cdot sin\varphi$$

Der Elektrotechniker spricht davon, dass die Blindenergie zwischen Quelle und Verbraucher hin und her pendelt. Blind- und Wirkleistung addieren sich geometrisch zur Scheinleistung (Abb. 7) mit welcher die Energiequelle belastet wird.

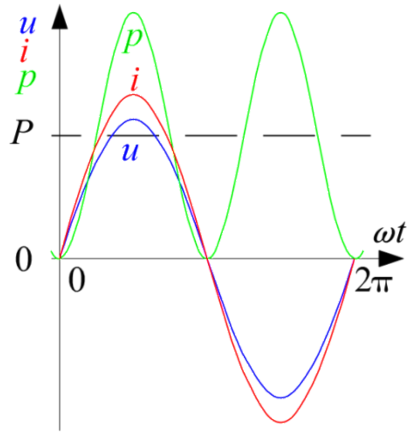


Abb.6a: Wirkleistung bei Phasengleichheit

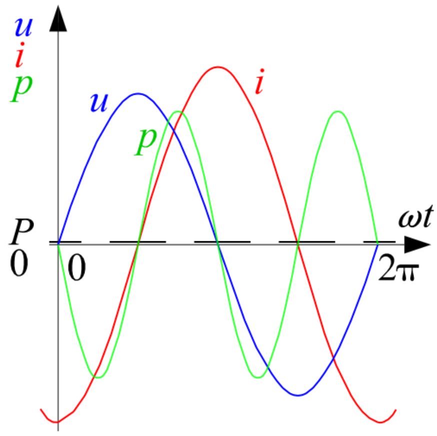


Abb. 6b: Blindleistung bei Phasenverschiebung

Das Verteilnetz wird durch die Verschiebungsblindleistung belastet. An Wirkwiderständen (Leiter) entstehen Wärmeverluste $P = I^2 \cdot R$, so dass höhere Leiterquerschnitte erforderlich sind. Die Blindleistung soll deshalb bereits am Entstehungsort kompensiert werden.

- Verrechnung monatlich als Mittelwert (Stromliefervertrag)
- Kompensation durch Kondensatoren (heute überwiegend verdrosselt)

2.2.2 Blindleistung durch Unsymmetrie

Unsymmetrische Belastungen mit reiner Wirkleistung verursachen ebenfalls Blindleistung und tragen so zu zusätzlicher Erwärmung grosser Generatoren bei.

- Berücksichtigung beim Anschluss leistungsstarker Abnehmer.
- Symmetrierschaltung nach Steinmetz, überwiegend dynamisch.

Beispiel: Erdkabel bilden aufgrund des geringen Abstandes zwischen den Leitern eine kapazitive Last. Die ca. 11,5 km lange 380-kV-Transversale Berlin bspw. besitzt eine Kapazität von 2,2 µF. Der Ladestrom beträgt 277 A. Dies entspricht einer Blindleistung von 110 Mvar.

2.2.3 Leistungsdreieck

In der komplexen Zahlenebene entspricht die Wirkleistung dem Realanteil (RE) und die Blindleistung dem Imaginäranteil (Im) von S. Die Scheinleistung entspricht dem komplexen Zeiger.

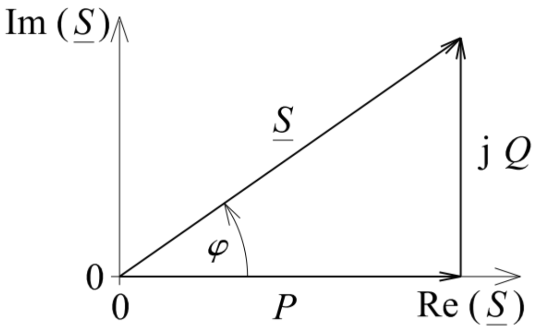


Abb. 7: Klassisches Leistungsdreieck

Beziehungen im einfachen Leistungsdreieck:

Wirkleistung P = U · I · cos(φ) in Watt [W]

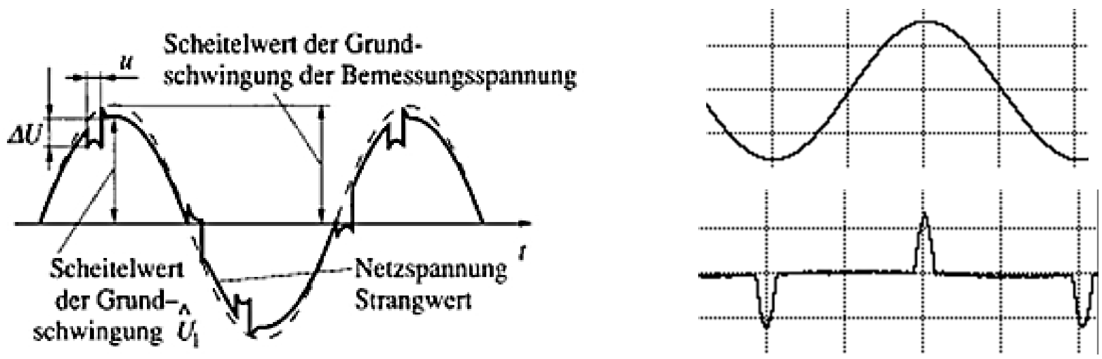
Blindleistung Q = U · I · sin(φ) in Var [var]

Scheinleistung S = U · I in Volt-Ampere [VA]

Leistungsfaktor cosφ = P/S (0 … 1)

3 Das Leistungsdreieck für nichtlineare Verbraucher

Seit dem Aufkommen steuerbarer Halbleiter macht sich eine zweite Form der Blindleistung – die Verzerrungsblindleistung – in meist negativer Weise bemerkbar. Diese wird durch nichtlineare Verbraucher (z.B. getaktete Netzteile, elektronische Vorschaltgeräte, Frequenzumrichter) hervorgerufen, also durch Verbraucher bei denen der Stromfluss nicht proportional zur angelegten Spannung verläuft (Abb. 8).



a) Kurzzeitige Spannungseinbrüche infolge Kommutierung in einem Stromrichter.

b) Sinusförmige Spannung und pulsförmiger Laststrom.

Abb. 8: Signalverformung durch nichtlineare Verbraucher

3.1 Verzerrungsblindleistung

Zu unterscheiden von der klassischen Blindleistung durch Phasenverschiebung ist Blindleistung, die durch Oberschwingungen entsteht und einen nichtsinusförmigen Verlauf der Wechselgrösse nach zieht. Man spricht hier von **Verzerrungsblindleistung** (Abb. 9).

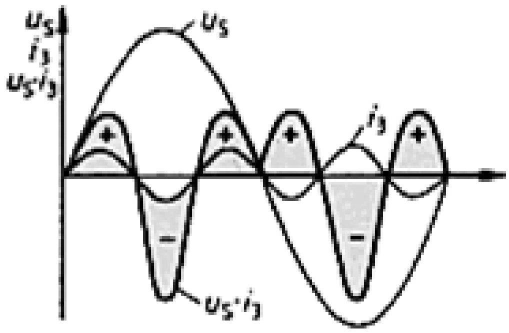


Abb. 9: Verzerrungsblindleistung durch die 3. Strom-Harmonische[3]

In der Grafik entspricht das Produkt aus Spannung u_S (f = 50 Hz) und Strom i_3 (f = 150 Hz) der Verzerrungsblindleistung.

Dies bedeutet im Kontext, dass das Produkt aus zwei reinen Sinusschwingungen unterschiedlicher Ordnungszahl – integriert über eine Periode – Null ergeben muss.

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_1^2}$$

Oberschwingungen in Mittel- und Niederspannungsverteilnetzen führen zu vielen Problemen.

- Überlastung von Neutralleitern
- Überhitzung von Transformatoren
- Fehlauslösung von Leistungsschalter
- Überbeanspruchung von Kompensations-Kondensatoren
- Skineffekte auf Leitungen und Abschirmungen

3.2 Modulationsblindleistung

Bei Direktumrichtern tritt aufgrund des Phasenanschnittes der Netzspannung sog. **Modulationsblindleistung** auf, welche den Leistungsfaktor verschlechtert.

$$M = \sqrt{S^2 - P^2 - D^2 - Q_1^2}$$

- Berücksichtigung beim Anschluss leistungsstarker Abnehmer (Schweißmaschinen, Lichtbogenöfen, Pulspaketsteuerungen etc.).
- Reduktion durch dynamische Kompensation (TSC, IGBT-Komp., SVC).

Beispiel: Bei einem gesteuerten Gleichrichter wurden folgende Grössen gemessen: Netzspannung 230 V, Laststrom 0,461 A, Wirkleistung 52 W, Blindleistung (induktiv) 40 var.

Berechne die Phasenverschiebung der Grundschwingung, die Verzerrungsblindleistung und den Gesamtleistungsfaktor.

a) Phasenverschiebung:

$S1 = (P^2 + Q^2)^{0.5} = [(52\ W)^2 + (40\ var)^2]^{0.5} = 65,6\ VA$

$\cos\phi = P/S1 = 52\ W/65,6\ VA = 0,79$

$\phi = 37,8°$

b) Verzerrungsblindleistung:

[3] Bildquelle: Elektrische Maschinen von Giersch, Harthus, Vogelsang (Teubner).

$S = U \cdot I = 230\ V \cdot 0{,}461\ A = 106\ VA$

$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{0.5} = (11236\ VA - 2704\ W - 1600\ var)^{0.5}$

$D = 83{,}3\ var$

c) Gesamtleistungsfaktor:

$\lambda = P/S = 52\ W \div 106\ VA$

$\lambda = 0{,}49$

Ein Gesamtleistungsfaktor von 0,49 führt zu erheblichen Netzrückwirkungen!

3.3 Gesamtblindleistung

Die geometrische Addition von Verschiebungs- und Verzerrungsblindleistung (und ggf. weiterer Blindleistungsformen) ergibt die Gesamtblindleistung.

$$Q = \sqrt{Q_{shift}^2 + D^2}$$

Die Verzerrungsblindleistung, welche durch Oberschwingungen hervorgerufen wird, muss geometrisch zur Verschiebungsblindleistung addiert werden (Abb. 10).

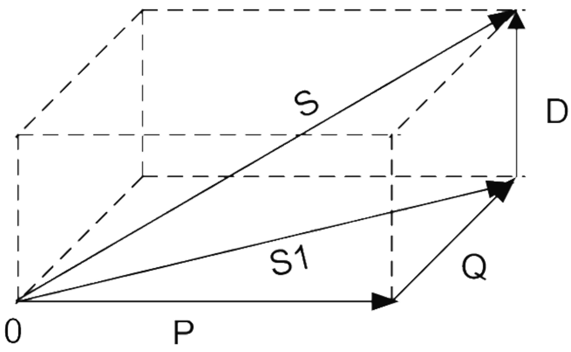


Abb. 10: Erweitertes Leistungsdreieck im Ortsraum[4]

Beziehungen im erweiterten Leistungsdreieck:

Scheinleistung $S1 = (P^2 + Q^2)^{0.5}$

Gesamtscheinleistung $S = (P^2 + Q^2 + D^2)^{0.5}$

Verzerrungsblindleistung $D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{0.5}$

Gesamtleistungsfaktor $\lambda = P/S$

3.4 Leistungsfaktor (Powerfactor)

Als Oberschwingungen noch nicht zum Problem in elektrischen Verteilnetzen wurden, sprach man lediglich vom „Cosinus phi“. Inzwischen müssen die Begriffe differenzierter angewandt werden, um Unklarheiten zu vermeiden.
Es müssen zwei unterschiedliche Leistungsfaktoren berücksichtigt werden.

▶ **Displacement Power Factor (DPF)**

Konventioneller Leistungsfaktor für die sinusförmige Grundschwingung:

$$\lambda = cos\varphi_1 = \frac{|P|}{S_1}$$

[4] Bildquelle: Wikipedia.

Mit dem *cosφ₁* lässt sich nur der einfachste Fall der Verschiebungsblindleistung erfassen.

▶ **True Power Factor (TPF)**

Gesamtleistungsfaktor, welcher den Einfluss von Oberschwingungen in elektrischen Verteilnetzen mitberücksichtigt:

$$\lambda = cos\Phi = \frac{|P|}{S}$$

Zum besseren Verständnis des Gesamtleistungsfaktors dient der *Leistungstetrader* mit den Phasenverschiebungswinkeln φ_1 und ϕ (Abb. 2-4).

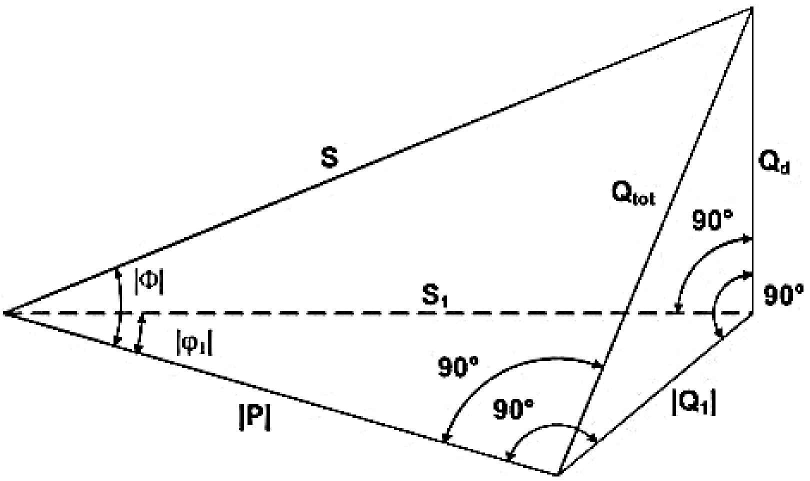


Abb. 11: Leistungstetraeder[5]

Zur Verbesserung des Leistungsfaktors muss die Blindleistung reduziert werden.

Prinzipiell werden zwei Verfahren angewandt:

a) Um die Verzerrungsblindleistung zu reduzieren, muss das Stromsignal durch Filter geglättet werden.

b) Um die Verschiebungsblindleistung zu reduzieren, muss der phasenverschobene Strom mit Kondensatoren kompensiert werden.

[5] Bildquelle: Umwandlung elektrischer Energie mit Leistunsgelektronik (Skript von Prof. Dr.-Ing. Ralph Kennel).

4 Kenngrössen von Strom- und Spannungssignalen

4.1 Effektivwert

Der **Effektivwert** eines Wechselstromes entspricht dem Wert eines reinen Gleichstromes, welcher im selben Zeitintervall die gleiche Leistung in einem ohmschen Widerstand umsetzt. Adäquates gilt für die Spannung.

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u(t)^2 dt}$$

Der Effektivwert wird im Englischen als „root mean square“ bezeichnet. Daher wird in Formeln der Index „rms“ zur Unterschiedung von anderen Grössen angegeben.

4.2 Echt-Effektivwert

Der **Echt-Effektivwert** wird im Englischen als „true root mean square“ (trms) bezeichnet. Begrifflich muss differenziert werden zwischen Effektivwert und Echt-Effektivwert. In praxi versteht man im Kontext verschiedene Messverfahren.

a) Ältere Analogmessgeräte messen nur den Gleichrichtwert und multiplizieren ihn mit dem Formfaktor (U_{ff} = 1,11), um so den Effektivwert zu erhalten. Das Resulat stimmt nur für Sinussignale; bei anderen Signalformen benötigt man andere Faktoren.

b) Viele Messgeräte messen nur den AC-Anteil eines Signals. Sobald ein DC-Anteil vorhanden ist, zeigen solche Geräte falsche Werte an.

c) Messgeräte, die den Effektivwert unabhängig von der Kurvenform anzeigen, erhalten die Zusatzbezeichnung True-RMS (TRMS).

4.3 DC-Komponente

Der DC-Anteil entspricht dem Mittelwert eines Signals.

$$U_{DC} = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)dt$$

4.4 Gleichrichtwert

Der Gleichrichtwert wird im Englischen als „Rectified value“ bezeichnet. Daher wird in den Formeln „rect“ als Index angegeben. Der Gleichrichtwert ist der Mittelwert eines gleichgerichteten Signal.

$$U_{Rect} = \frac{1}{T}\int_0^T |u(t)|dt$$

Heute gibt es nur noch wenige Applikationen in denen der Gleichrichtwert eine Rolle spielt.

4.5 Formfaktor

Der Formfaktor ist das Verhältnis von Effektivwert zu Gleichrichtwert eines Signals.

$$U_{ff} = \frac{U_{rms}}{U_{rect}}$$

Für Sinussignale ergibt sich ein Wert von ≈ 1,11.

4.6 Crest Faktor

Der Crest Faktor ist das Verhältnis von Spitzenwert zum Echt-Effektivwert eines Signals.

$$U_{cff} = \frac{U_{peak}}{U_{trms}}$$

Bei digitalen Messgeräten findet man meist zwei Zahlenwerte für jeden Messbereich.

- Nennwert (z.B. 250V) für den jeweiligen Messbereich.
- Spitzenwert (z.B. 400V) für den höchstzulässigen Scheitelwert einer Meßgrösse.

Mit diesen Angaben lässt sich der „Crest Faktor“ berechnen (im Beispiel 400V ÷ 250V = 1,6).

4.7 Spitzenwert

Der Spitzenwert entspricht der größten Amplitude eines Signals.

- u_{peak} als grösster Betrag des positiven oder negativen Spitzenwertes.
- u_{pp} als Differenz von größtem und kleinstem Spitzenwert eines Signals.

4.8 Oberschwingungsgehalt

Mit dem Oberschwingungsgehalt, als Verhältnis des Effektivwertes aller Oberschwingungen zum Gesamteffektivwert einer Wechselgrösse, steht der Grundschwingungsgehalt in folgender Beziehung:

$$g^2 + d^2 = 1$$

4.9 Grundschwingungsgehalt

Unter dem Grundschwingungsgehalt versteht man das Verhältnis zwischen dem Effektivwert der Grundschwingung (1. Harmonische) zum Gesamteffektivwert einer Wechselgrösse (Summe aller Harmonischen).

Insbesondere der Grundschwingungsgehalt des Stromes ist technisch von Bedeutung.

$$g_i = \frac{I_1}{I_{eff}}$$

Ist der Strom frei von Oberschwingungen, also sinusförmig, so ist $g_i = 1$. Unter der Voraussetzung einer annähernd sinusförmigen Spannung ergibt sich für den Leistungsfaktor:

$$\lambda = g_i \cdot cos\varphi$$

4.10 Verzerrungsfaktor

Oberschwingungen bewirken eine Verzerrung der Grundschwingung (Abb. 6-1). In Starkstromnetzen mit nichtlinearen Lasten erweisen sich insbesondere die 3. und 5. Harmonische als primäre Ursache für zahlreiche Störungen.

▶ **Total Harmonic Distortion** → Als gesamte harmonische Verzerrung (THD) wird der Quotient aus der Summe der Quadrate aller Oberschwingungsanteile zum Quadrat der Grundschwingung definiert. Es handelt sich um die Effektivwerte von Strom bzw. Spannung.

$$THD = \frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \cdots + U_n^2}{U_1^2}$$

Bei einem THD > 4 auf dem Spannungsverlauf muss mit Störungen gerechnet werden.

▶ **Distortion Factor** → Als Verzerrungsfaktor (DF) oder Klirrfaktor[6] bezeichnet man den Quotienten aus der Summe der Oberschwingungen zum Effektivwert des Gesamtsignals.

$$DF = \sqrt{\frac{A_0^2 + A_1^2 + A_2^2 + \cdots + A_n^2}{A_{eff}}}$$

A_0 ist die Amplitude des DC-Anteils.

Beträgt der Klirrfaktor z.B. 30 %, so bedeutet dies, dass rund $^1/_3$ des Signals in Form von Oberschwingungen existiert, die in einem Verbraucher in unnütze Erwärmung umgewandelt werden.

[6] In der Energietechnik kommt dem Klirrfaktor d (früher k) eine geringere Bedeutung zu als dem Grundschwingungsgehalt. In der Audiotechnik dagegen ist der Klirrfaktor nach wie vor eine wichtige Grösse.