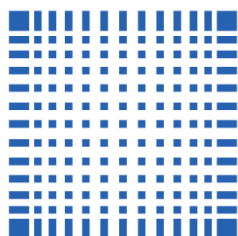


hochschule mannheim

Prof. Dr. W. Mombauer



hochschule mannheim

Prof. Dr. W. Mombauer



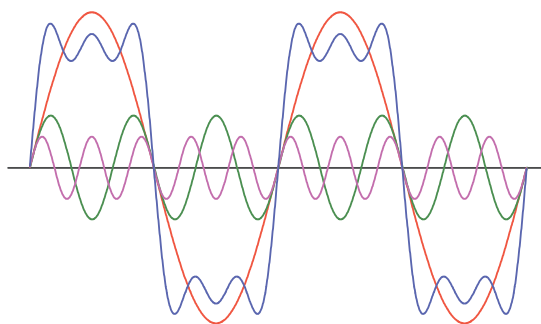
Power Quality

Prof. Dr. W. Mombauer



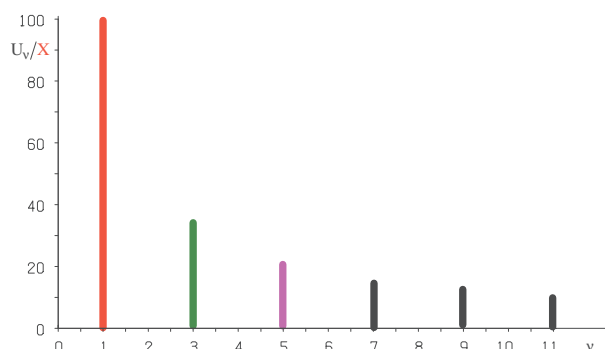
hochschule mannheim

Oberschwingungen - Grundlagen



Bei relativen Spektren – Bezugsgröße X beachten:

- DIN EN 50160:2002 U_n
 - DIN EN 50160:2008: U_1
 - DIN EN 61000-2-4: U_1
- jedoch THD immer U_1



Bei Phasenwinkel – Bezugsgröße beachten:

- Bei Leistungen Winkel zwischen I_v und U_v
- DIN EN 61000-3-12: Winkel zwischen I_v und U_1 (Referenzkanal)



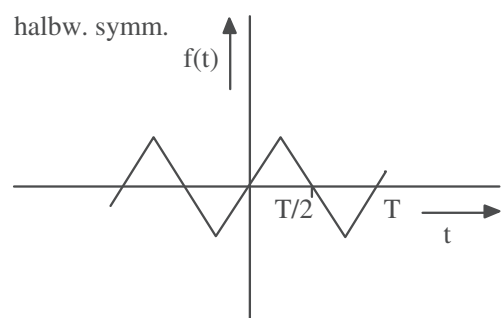
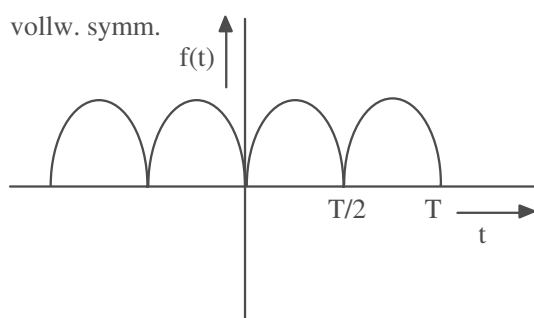
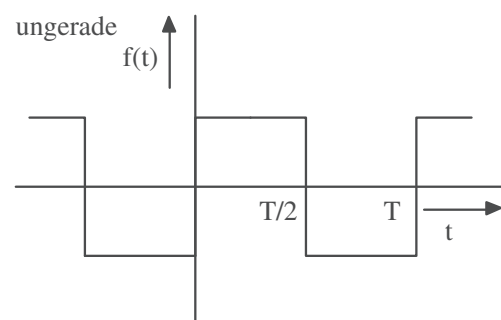
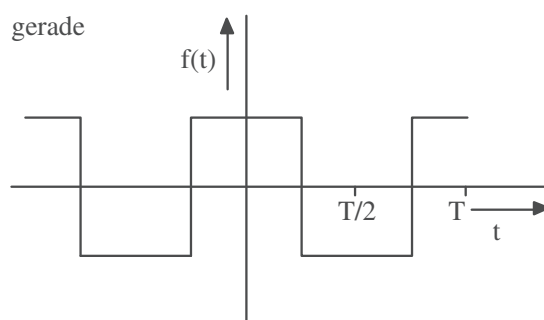
Eine periodische Funktion der Periodendauer T kann unter bestimmten Voraussetzungen in eine Fourierreihe entwickelt werden.

$$f(t) = a_0 + \sqrt{2} \sum_{v=1}^{\infty} [A_v \cos(v\omega t) + B_v \sin(v\omega t)]$$

mit $\omega = \frac{2\pi}{T}$

ω ist die Frequenz der Grundschiwingung; in Energieversorgungsnetzen gilt $\omega = \omega_v = 2\pi 50 \text{ s}^{-1}$.

Die Koeffizienten a_0 , a_v , b_v werden als **Fourierkoeffizienten** bezeichnet
 v ist die Ordnungszahl



Symmetrieeigenschaften



Zusammenfassend gilt:

- Für reine Wechselgrößen ist $A_0 = 0$
- Gerade Fkt. enthalten keine Sinusanteile, $B_v = 0$
- Ungerade Fkt. enthalten keine Kosinusanteile, $A_v = 0$
- Funktionen mit Vollwellensymmetrie haben nur geradzahlige Oberschwingungen, $v = 2, 4, \dots$
- Funktionen mit Halbwellensymmetrie haben nur ungeradzahlige Oberschwingungen, $v = 1, 3, \dots$



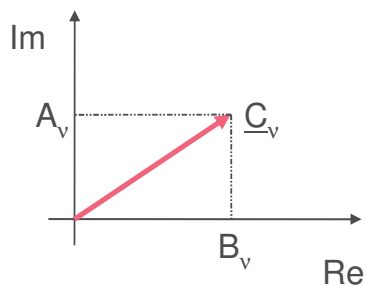
- Signale mit steilen Flanken führen zu Oberschwingungen höherer Ordnung (Spektrum ausgedehnt)
- Signale mit weichem Verlauf (keine steile Flanken) begrenzen die OS auf niedrige Ordnungszahlen.
- Pulsförmige Signale führen zu einem ausgedehnten Spektrum mit langsam abfallenden Amplituden
- Die für einen Stromrichter maßgeblichen, typischen Ordnungszahlen erhält man mit

$$v = k \cdot p \pm 1 \quad \text{mit} \quad k=1,2,3,\dots$$

p ist die Pulszahl.



Darstellung in der komplexen Ebene



$$\underline{C}_v = B_v + jA_v$$

$$= C_v e^{j\varphi_v}$$

$\underline{C}_v$ ist der Zeiger der v-ten Oberschwingung

$$C_v = \sqrt{A_v^2 + B_v^2} \quad \text{für } v = 1, 2, \dots$$

$$\varphi_v = \arctan \frac{A_v}{B_v}$$



Effektivwert

Der Effektivwert einer nichtsinusförmigen periodischen Zeitfunktion ist gleich der Wurzel aus der Summe der Effektivwert-Quadrate der einzelnen Harmonischen.

$$U = \sqrt{\sum_{v=0}^{\infty} U_v^2}$$

$$I = \sqrt{\sum_{v=0}^{\infty} I_v^2}$$



Gesamtoberschwingungsgehalt THD (EN 50160)

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{v=2}^{40} u_v^2} \quad u_v = \frac{U_v}{U_1}$$

Richtwerte:

Gleichrichter mit kapazitiver Glättung (einphasig): THD 0,80

6 pulsiger Umrichter mit Stromglättung:
THD 0,28

12 pulsiger Umrichter:
THD 0,15



Klirrfaktor

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{\sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} U_v^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{\tilde{U}} \quad \text{für } U_0 = 0$$

Grundschwungsgehalt

$$g_U = \frac{U_1}{\sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} U_v^2}} = \frac{U_1}{\tilde{U}} \quad \text{für } U_0 = 0$$

$$g^2 + k^2 = 1$$



Wirkleistung

$$P_w = U_0 I_0 + \sum_{v=1}^{\infty} P_{w,v}$$

$$P_w = U_0 I_0 + \sum_{v=1}^{\infty} U_v I_v \cos(\varphi_{u,v} - \varphi_{i,v})$$

Die Wirkleistung ist gleich der Summe der von den Harmonischen gebildeten Wirkleistungen.

Produkte von Strömen und Spannungen unterschiedlicher Frequenz liefern keinen Beitrag zur Wirkleistung.



Blindleistung

$$Q = \sum_{v=1}^{\infty} U_v I_v \sin(\varphi_{u,v} - \varphi_{i,v})$$

Scheinleistung

$$S = U \cdot I$$

Für nichtsinusförmige Ströme und Spannungen ist

$$S \neq \sqrt{P_w^2 + Q^2}$$



Für **sinusförmige** Spannung und nichtsinusförmigen Strom erhält man aufgrund der Orthogonalitätseigenschaft:

Wirkleistung: $P = UI_1 \cos \varphi_1 = Sg_1 \cos \varphi_1$

Scheinleistung: $S = UI = U \sqrt{\sum_{v=1}^{\infty} I_v^2}$

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



Definiert man mit

$$Q_1 = UI_1 \sin \varphi_1 = Sg_1 \sin \varphi_1$$

die Grundschwingungsblindleistung, dann erhält man für die Scheinleistung

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

D wird als Verzerrungsleistung bezeichnet.

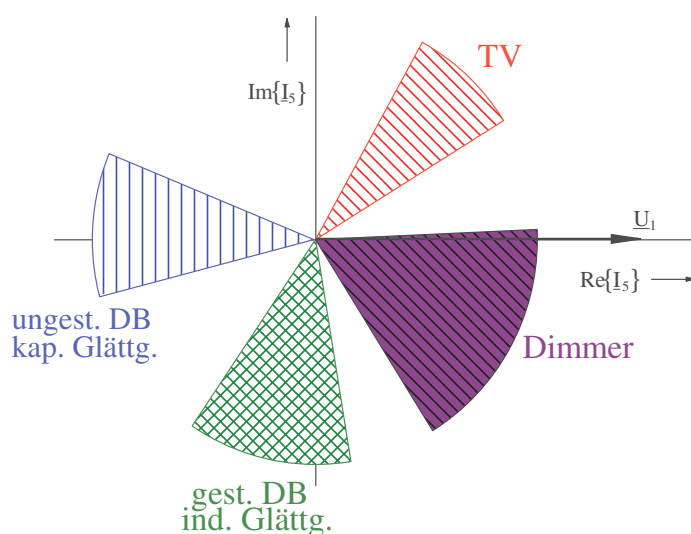
$$D = U \sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} I_v^2}$$



Leistungsfaktor bei sinusförmiger Spannung

$$\lambda = \frac{|P|}{S} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1 = g \cos \varphi_1$$

Man erkennt, daß nur bei sinusförmiger Spannung und Strom, d.h. für $g = 1$ der Leistungsfaktor λ gleich dem Verschiebungsfaktor $\cos \varphi_1$ ist.



OS werden vektoriell addiert

GR m. C:	k_5	$\sim$	0,95
Dimmer m. R:	k_5	$\sim$	0,6
DBS gest.	k_5	$\sim$	0,65..0,95

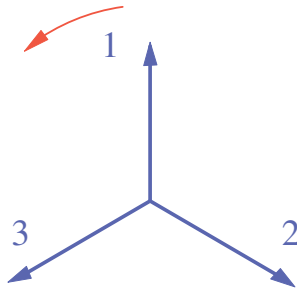
$$k_v = \frac{|\sum I_v|}{\sum |I_v|}$$

Gleichphasigkeitsfaktor

Phasenlage von I_5 bezogen auf $\underline{U}_1$



Reguläre Oberschwingungen



$$\underline{U}_{1v} e^{-jv\omega \frac{T}{3}} = \underline{U}_{1v} e^{-jv \frac{2\pi}{3}} = \underline{U}_{2v}$$

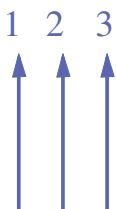
$$\underline{U}_{1v} e^{-jv\omega \frac{2T}{3}} = \underline{U}_{1v} e^{-jv \frac{4\pi}{3}} = \underline{U}_{3v}$$



Reguläre Oberschwingungen

$v = 3g$ m. $g = 1, 2, 3, \dots$
 $v = 3, 6, \dots$

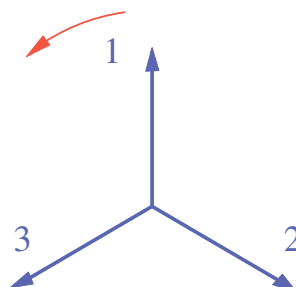
Nullsystem



$$\underline{U}_{1v} = \underline{U}_{2v} = \underline{U}_{3v}$$

$v = 3g + 1$ m. $g = 1, 2, 3, \dots$
 $v = 4, 7, \dots$

Mitsystem

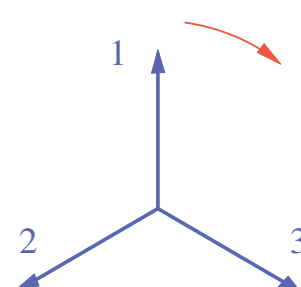


$$\underline{U}_{2v} = \underline{U}_{1v} e^{-j \frac{2\pi}{3}}$$

$$\underline{U}_{3v} = \underline{U}_{1v} e^{-j \frac{4\pi}{3}}$$

$v = 3g - 1$ m. $g = 1, 2, 3, \dots$
 $v = 2, 5, \dots$

Gegensystem



$$\underline{U}_{2v} = \underline{U}_{1v} e^{-j \frac{4\pi}{3}}$$

$$\underline{U}_{3v} = \underline{U}_{1v} e^{-j \frac{2\pi}{3}}$$



Folgerungen

- In unsymmetrischen Systemen treten für alle Ordnungen Mit-, Gegen- und Nullsysteme auf.
- Für höhere Ordnungen sind stets unsymmetrische Systeme zu erwarten
- ***Das Vorhandensein von Mit- und Gegensystemkomponenten für die dritte Oberschwingung kann ein Indiz für einen nichtregulären unsymmetrischen Betrieb von Anlagen, z.B. durch Ausfall einzelner Kompensations-Kondensatoren, sein.***



- Symmetrische Stromsysteme mit durch 3 teilbarer Ordnungszahl werden beim DY-Transformator nicht von der NS- in die MS übertragen
- Oberschwingungen mit durch drei teilbarer Ordnungszahl werden nur dann über Transformatoren übertragen, wenn sowohl Ober- als auch Unterspannungsseite in Stern geschaltet und geerdet sind und keine Ausgleichswicklung vorhanden ist.
- Die unsymmetrischen Anteile der Nullsysteme, die von der ungleichen Verteilung der durch drei teilbaren Oberschwingungsströme in den drei Leitern herrühren, werden über einen Transformator, z.B. vom Nieder- in das Mittelspannungsnetz, übertragen.

Beispiel: Lichtbogenofen über einen Dreieck-Dreieck-Transformator betrieben

Ein Lichtbogenofen erzeugt dritte Oberschwingungen. Aufgrund des stark unsymmetrischen Betriebes sind Oberschwingungsspannungen dritter Ordnung unter- und überspannungsseitig vorhanden

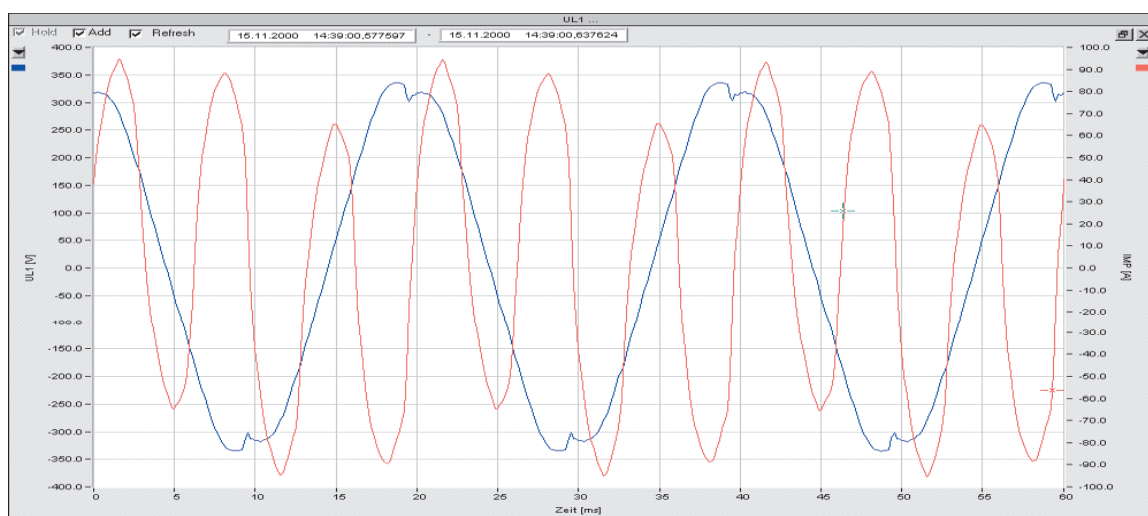


- Stromüberschwingungen mit durch drei teilbarer Ordnungszahl bilden bei symmetrischer Belastung in einem Drehstromsystem **Nullsysteme** aus.

Sie überlagern sich im Neutralleiter zu einem Strom dreifacher Größe.

Brandgefahr!

- TN-C Netz ist nicht geeignet
- TN-S Netz verwenden

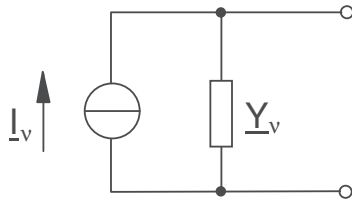


Neutralleiterbelastung im Netz bei elektronischen Geräten (ZDF)



Oberschwingungen werden durch nichtlineare Lasten verursacht.

- Der Zeitverlauf des Stromes ist nicht proportional der Spannung; die UI- Kennlinie ist nichtlinear
- Oberschwingungserzeugende Lasten können durch Oberschwingungs-Stromquellen $\underline{I}_v$ mit einer Paralleladmittanz $\underline{Y}_v$ dargestellt werden, die Oberschwingungsströme in das Netz einspeisen (Störaussendung)



- Der in das Netz eingeführte OS-Strom ist unabhängig vom Netzanschlußpunkt



Gleichrichter mit kapazitiver Glättung

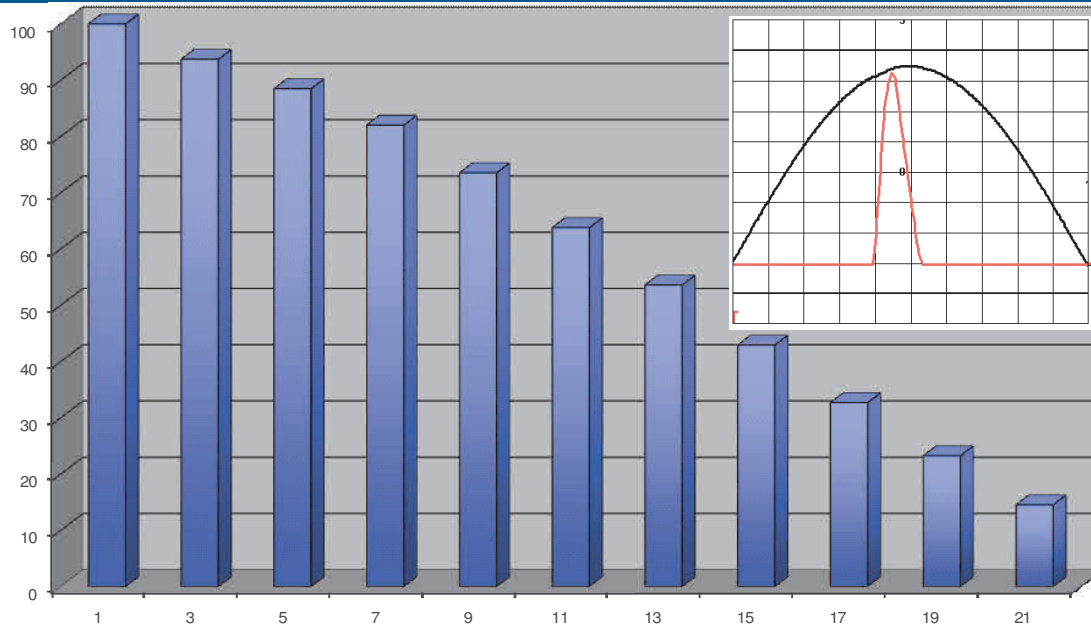
- langsam abfallendes Spektrum

Einphasen-Netzgeräte

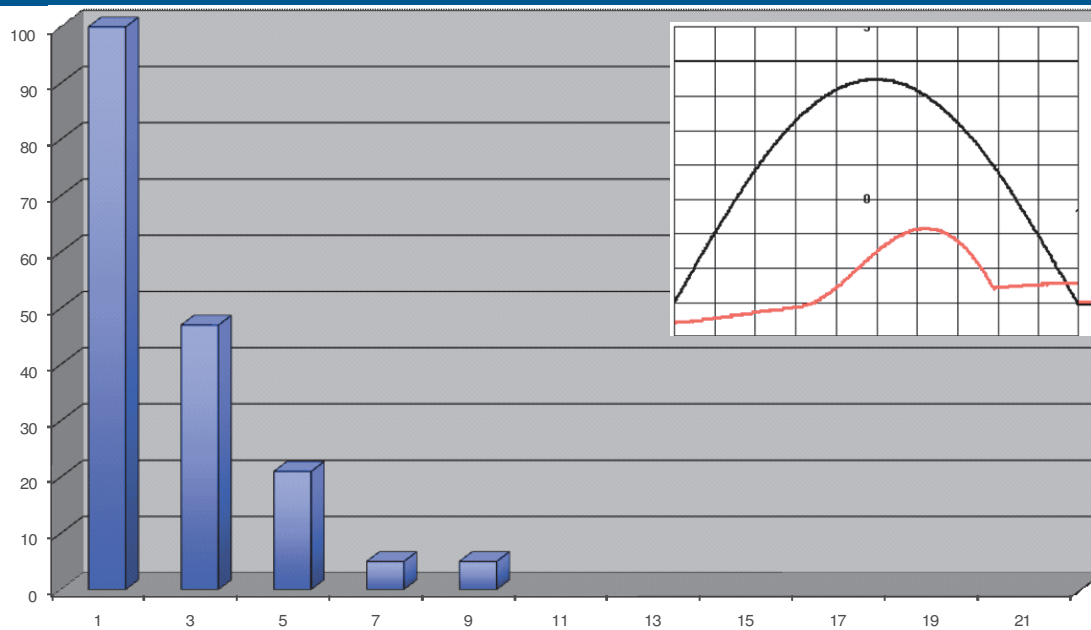
- Mit Eingangstransformator
 - Durch Induktivität Stromglättung
 - Oberschwingungen werden reduziert

Schaltnetzteile

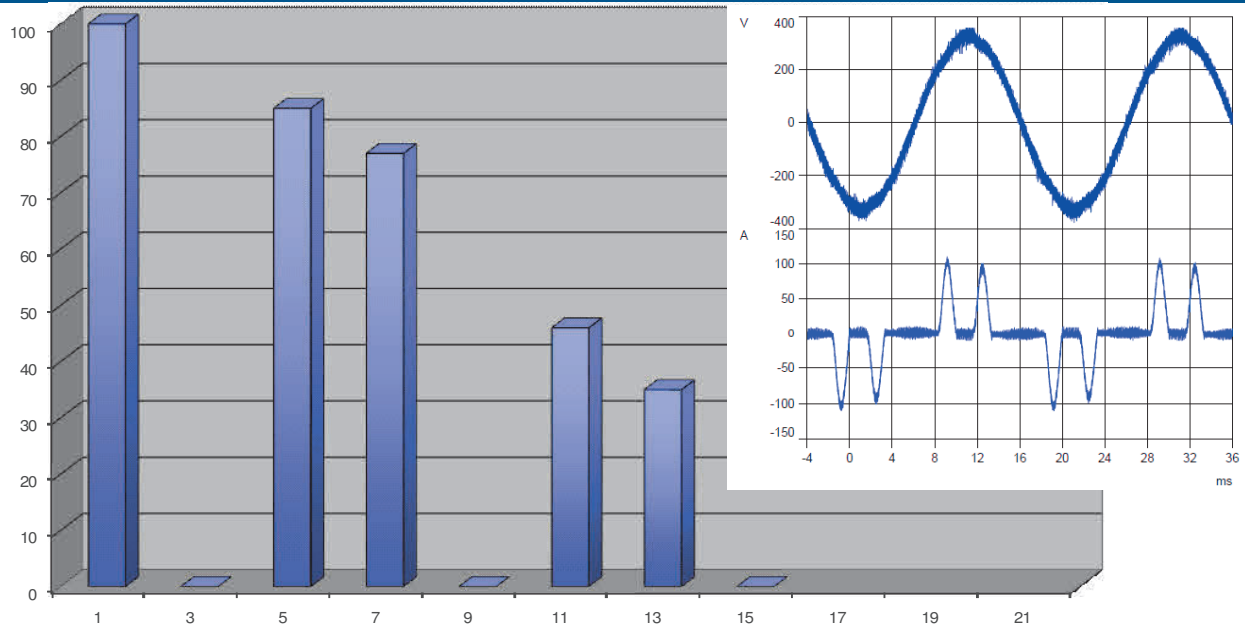
- Ohne Eingangstransformator
- Ungeradzahlige Oberschwingungen mit hohem Anteil der 3. Oberschwingung



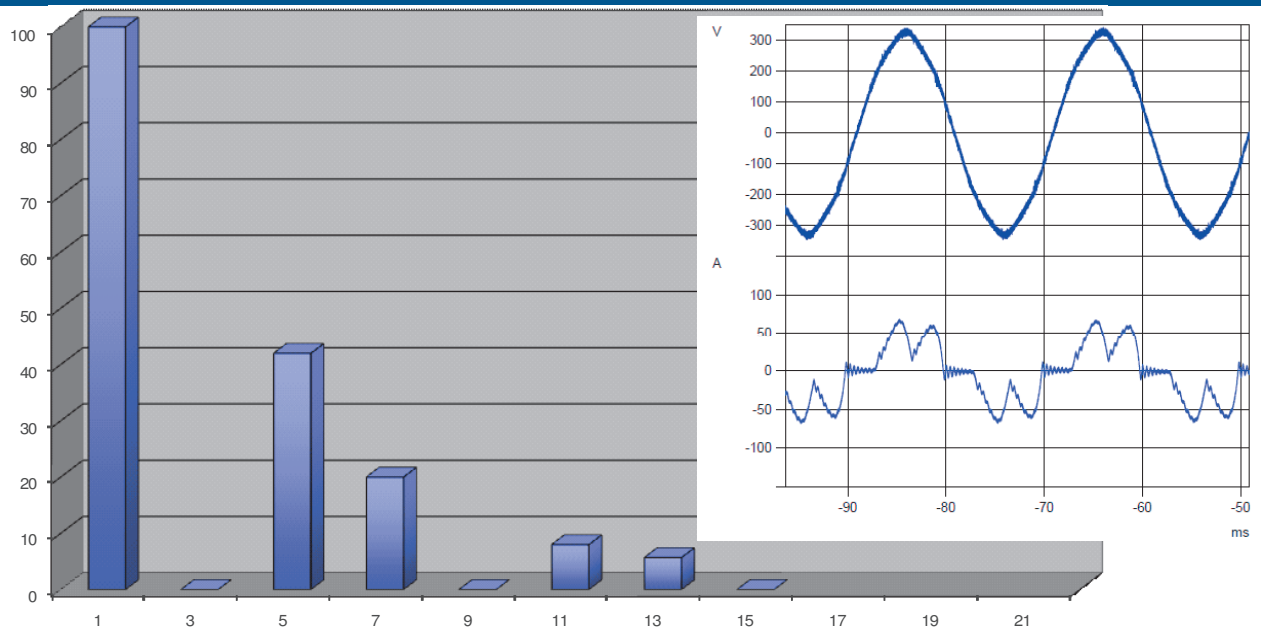
Schaltnetzteil, hohe dritte Oberschwingung, langsam abfallendes Spektrum



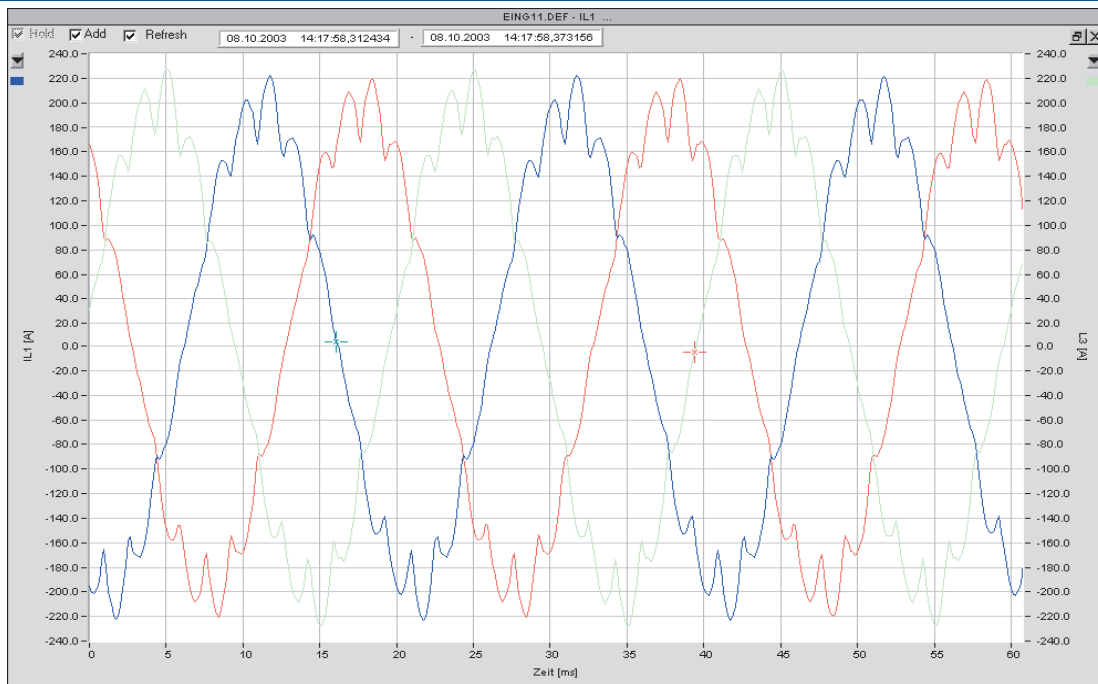
Schaltnetzteil mit Transformator - Stromglättung



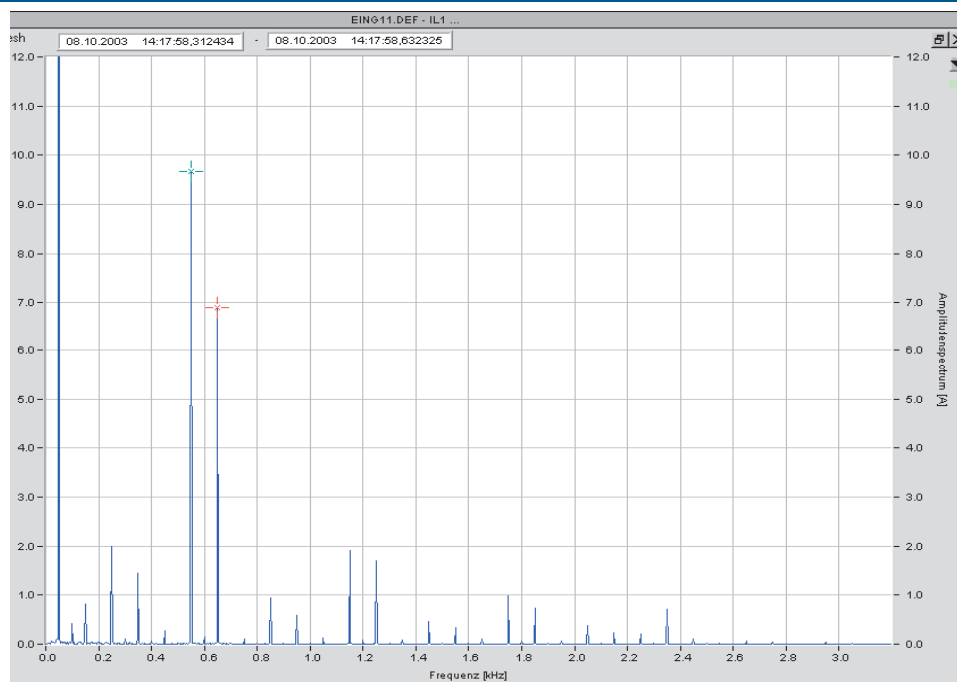
Drehstrombrücke 6pulsig



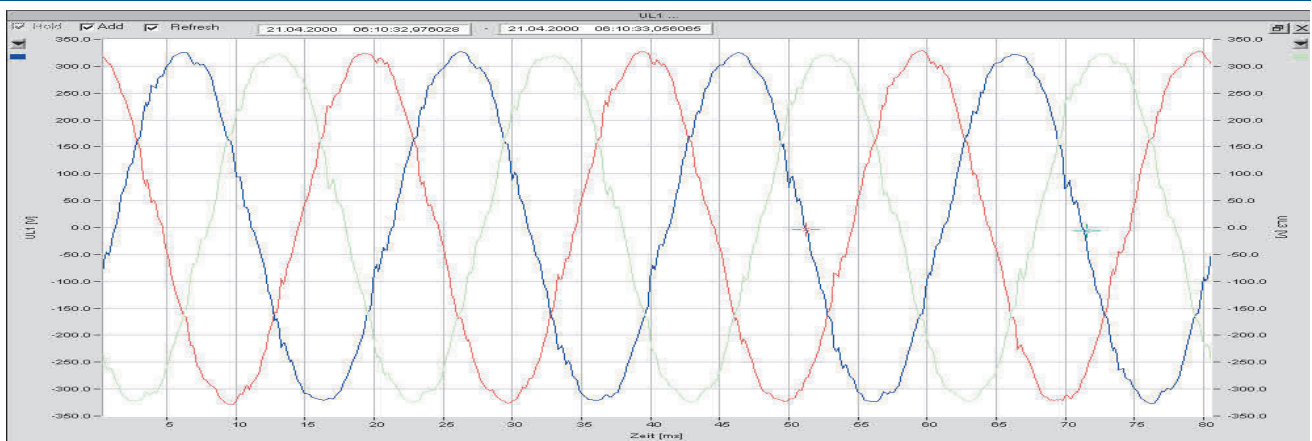
Drehstrombrücke, 6pulsig, 4% verdrosselt



12pulsiger Gleichrichter



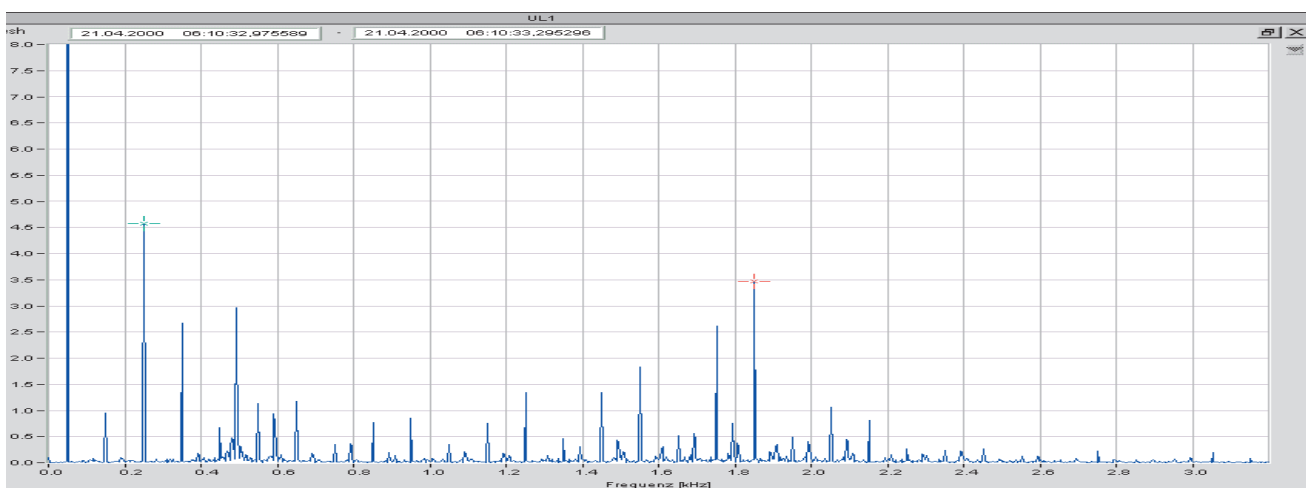
12pulsiger Gleichrichter



Industrielast

Aufeinander folgende Halbschwingungen sehen jeweils anders aus.

Folgerung: zusätzliche Zwischenharmonische



Industrielast – Oberschwingungen und Zwischenharmonische



Erfahrung

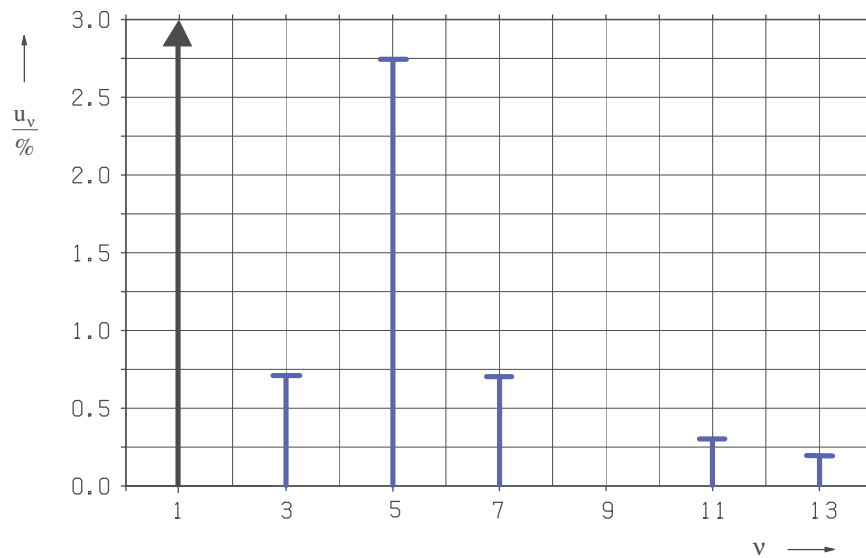
- OS-Ströme führen i.d.R. nicht zu Störungen
Ausnahme: thermische Belastungen, Überhitzung des Neutralleiters
- Oberschwingungsspannungen sind i.d.R. die Ursache für Störungen



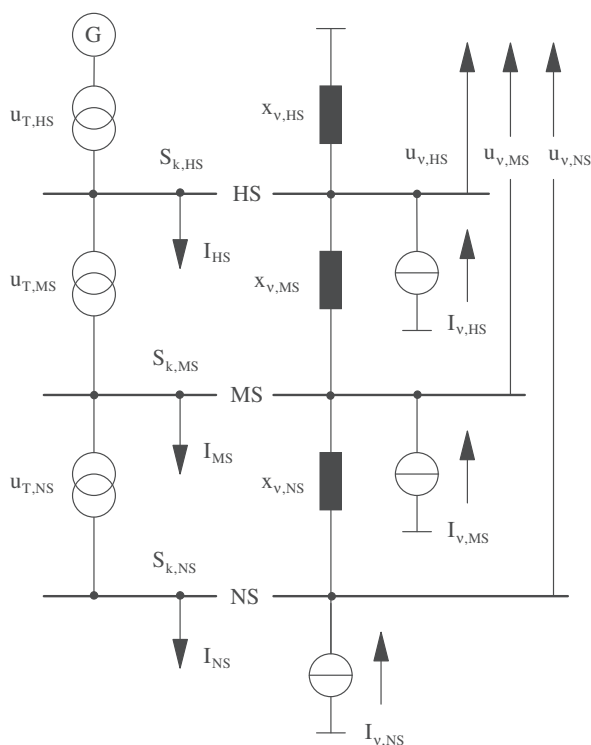
Oberschwingungsspannung

- OS-Strom ruft an der linearen Netzimpedanz Spannungsabfälle hervor
- Das Verhältnis $\underline{Z}_v = \underline{U}_v / \underline{I}_v$ wird als OS-Impedanz bezeichnet
- Die OS-Spannung ist groß, wenn
 - $\underline{I}_v$ groß ist (Störaussendung)
 - $\underline{Z}_v$ groß ist
- Die gleiche Last an unterschiedlichen Anschlusspunkten führt zu unterschiedlichen OS-Spannungen

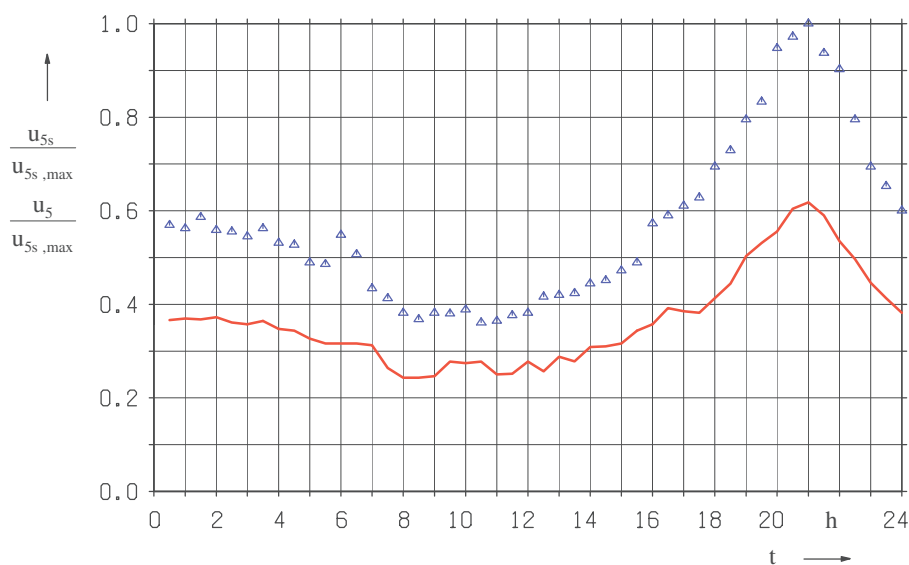
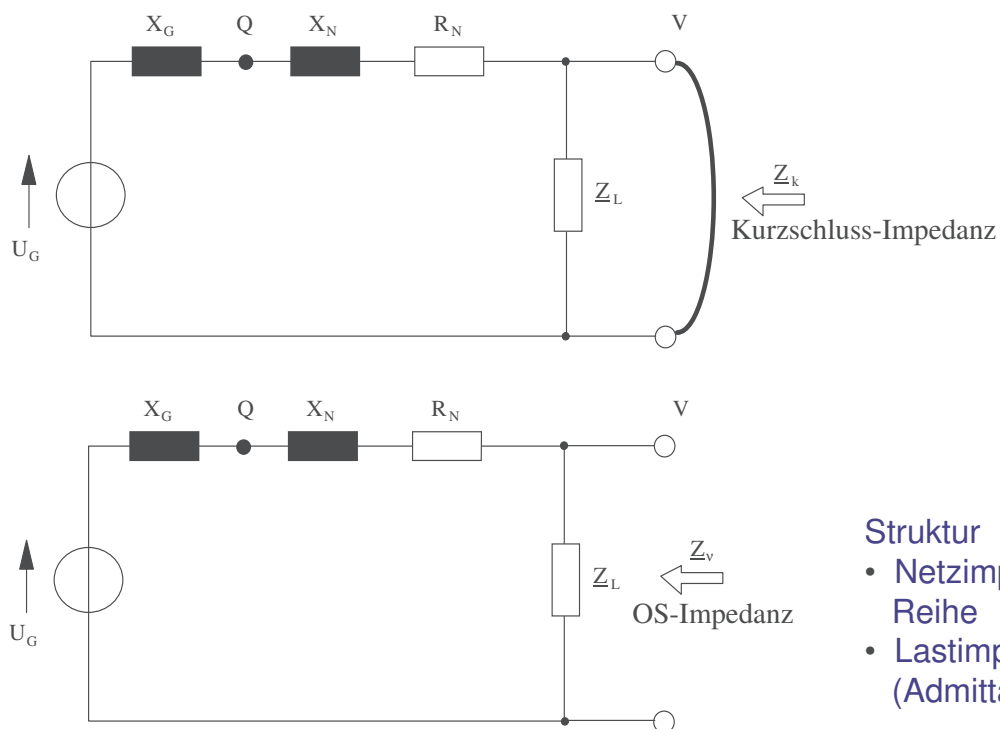
$$\underline{U}_{v,1} \neq \underline{U}_{v,2} \quad \text{mit} \quad \underline{I}_{v,1} = \underline{I}_{v,2} \quad (\text{Konstant-Stromquelle})$$



Oberschwingungen im Mittelspannungsnetz, 99%-Werte



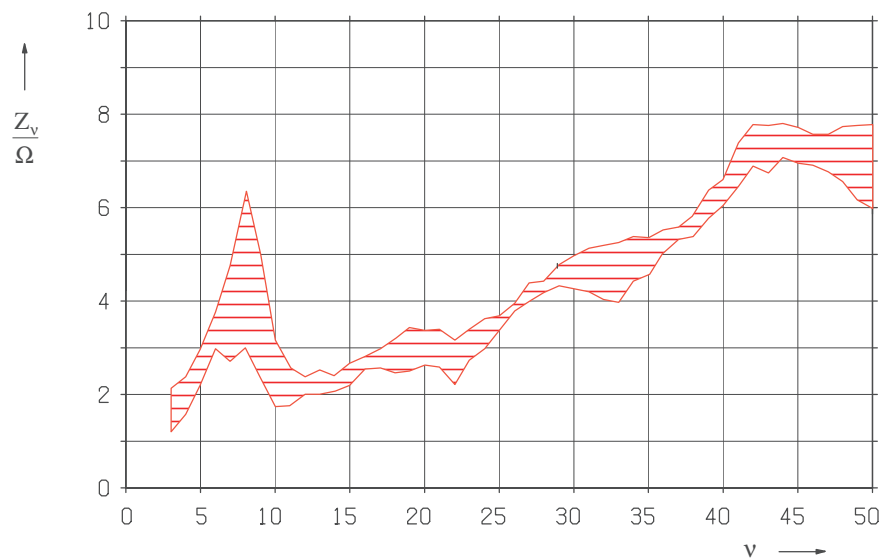
- OS erzeugende Anlagen führen OS-Ströme in das Netz ein - Stromquelle
- Spannungsabfälle in allen Netzebenen
 $u_{k,NS}/u_{k,MS}/u_{k,HS} = /6\%/14\%/10\%$
 $u_{v,NS}/u_{v,MS}/u_{v,HS} = /0,2/0,5/0,3/ = k_N$
 k_N Netzebenenfaktor
- Die OS-Spannung in der NS ist gleich der Summe der OS-Spannungen aller Netzebenen.



Tagesgang der 5. Oberschwingung im Mittelspannungsnetz bezogen auf u_{5s} .

u_5 Mittelwert (mehrere Wochtage)

u_{5s} Mittelwert + Standardabweichung



Oberschwingungsimpedanz im Mittelspannungsnetz - Parallelresonanz



- Reihenschwingkreis (L und C in Reihe)
Reihenresonanz verringert die Impedanz
- Parallelschwingkreis (L und C parallel)
Parallelresonanz erhöht die Impedanz
- Bei steigender Frequenz wechseln sich
Reihen- und Parallelresonanzen ab

Lage der ersten Parallel-Resonanzfrequenz (Lastabhängig)

$$v_{\text{res}} = \sqrt{\frac{S_T}{u_k Q_C}} = \sqrt{\frac{S_k}{Q_C}} = \frac{1}{U_n} \sqrt{\frac{S_k}{\omega_l C_N}}$$

Güte (MS): Schwachlast Q_P 1..5

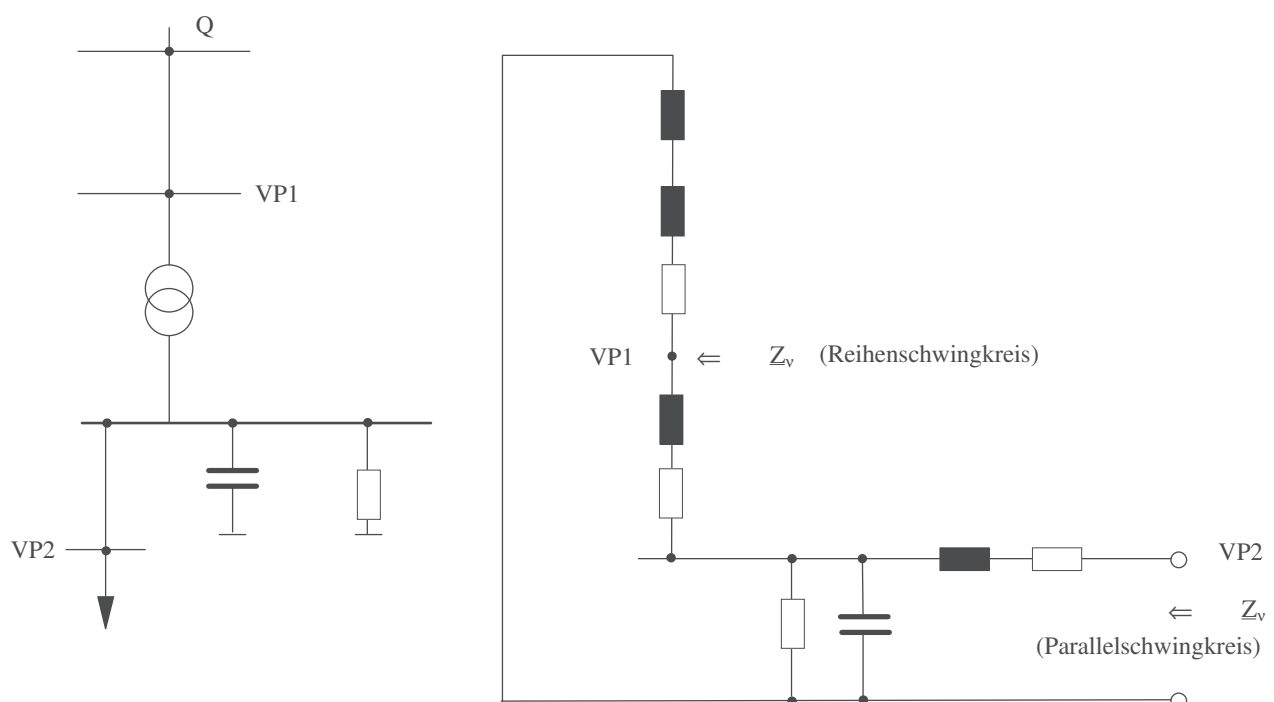


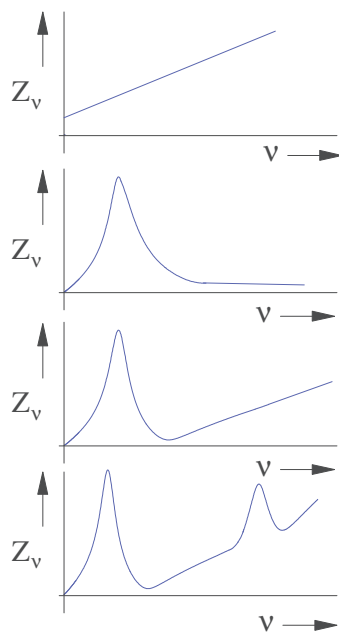
Die Resonanzfrequenz

- sinkt mit der Systemlänge ($Q_C \sim l/\text{km}$)
- liegt in Kabelnetzen deutlich niedriger als in Freileitungsnetzen gleicher Ausdehnung ($Q_{C,\text{Kabel}} = 30..80 Q_{C,\text{Freiltg}}$)
- ist bei gleicher Systemlänge und –struktur umgekehrt proportional zur Netzspannung
Richtwerte: NS: > 2kHz, MS: 300-500 Hz

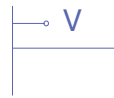
Dämpfung (Güte) ist abhängig von

- Ohmsche (frequenzabhängige) Leitungs- und Transformator-Widerstände
- Ohmsche Netzlast
- In Industrienetzen ist die Dämpfung oft geringer als in öffentlichen Netzen





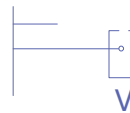
ohmsch-induktiv
z.B. öffentliches NS-Netz



Grundresonanz
z.B. HS-, MS-Netz – Nahe SS



Grundresonanz + Leitung
z.B. HS-, MS-Netz



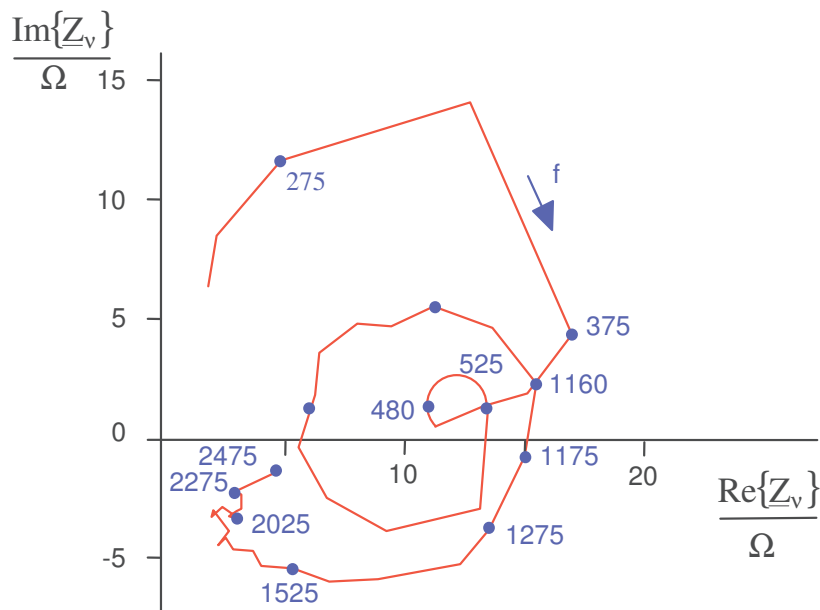
Grund- und Teilresonanz
Grundresonanz + Leitung +
(Kabel-)Teilnetz
z. B. Industrienetz,
2. Resonanz oft schwach gedämpft

Netz-Resonanzen



Erkennen von Parallelresonanzen

- Alle OS-Erzeuger erzeugen Gruppen von Oberschwingungsströmen
Eine einzelne dominante OS-Spannung deutet auf eine Parallelresonanz hin
- Vergleich von Strom- und Spannungs-Spektrum durch Messung

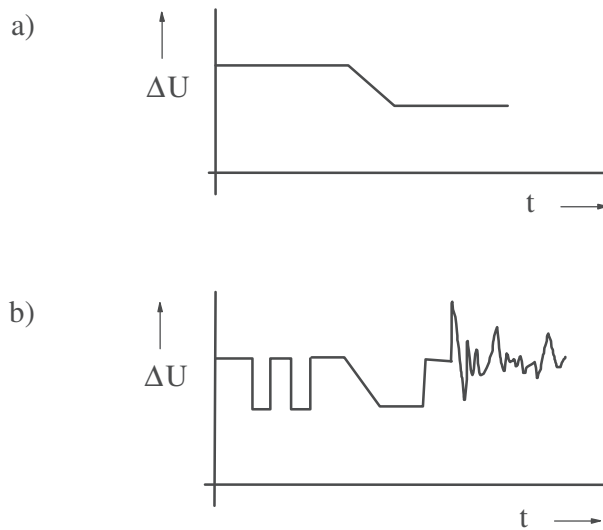


Mittelspannung 20 kV - Stadtnetz, Impedanztyp CS Parallelresonanzen:
375 Hz/ 1150 Hz

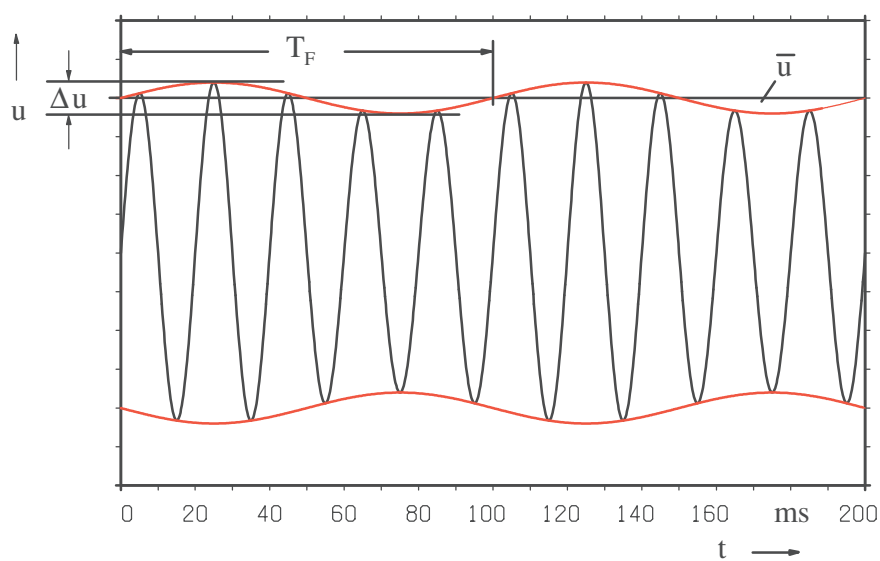


Messung von Oberschwingungen

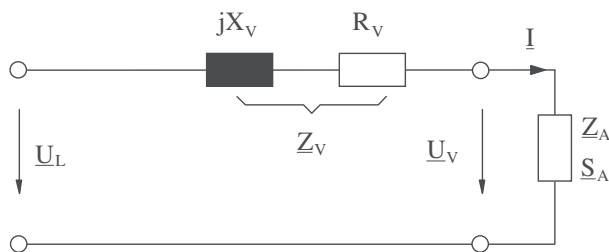
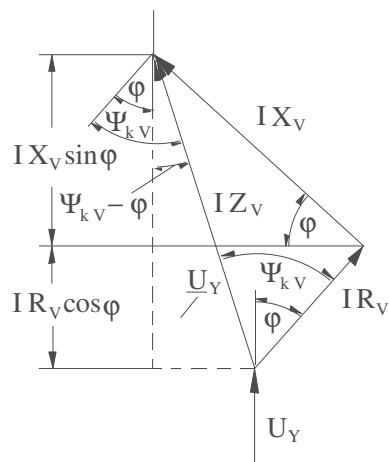
- Oberschwingungsmessgerät nach EN61000-4-7
- Beurteilt wird die
 - Außen-Neutralleiterspannung in NS-Netzen
 - Verkettete Spannung in MS-/HS-Netzen
- Abbildungseigenschaften von Strom- und Spannungswandlern beachten



- a) Spannungsänderung
b) Spannungsschwankung



Sinusförmige Spannungsschwankung
Flickerfrequenz $f_F = 1/T_F = 10 \text{ Hz}$



Längsspannungsänderung

$$\Delta U_Y = I(R_V \cos \varphi + X_V \sin \varphi)$$

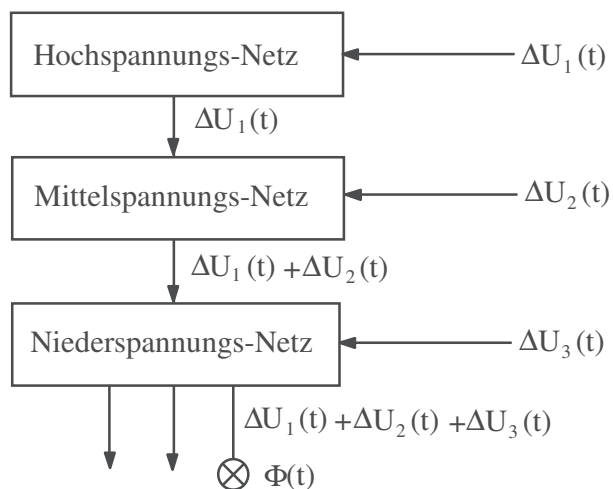
$$\Delta U = \sqrt{3} \Delta U_Y$$

$$\frac{\Delta U}{U} = d = \frac{\sqrt{3} I U (R_V \cos \varphi + X_V \sin \varphi)}{U^2}$$

$$S_A = \sqrt{3} I U \quad U = \sqrt{3} U_Y \quad S_{kV} = \frac{U^2}{Z_V}$$

$$\cos(\psi_{kV} - \varphi) = \frac{I R_V \cos \varphi + I X_V \sin \varphi}{I Z_V}$$

$$d = \frac{S_A}{S_{kV}} \cos(\psi_{kV} - \varphi)$$



Überlagerung von Spannungsschwankungen in den drei Netzebenen

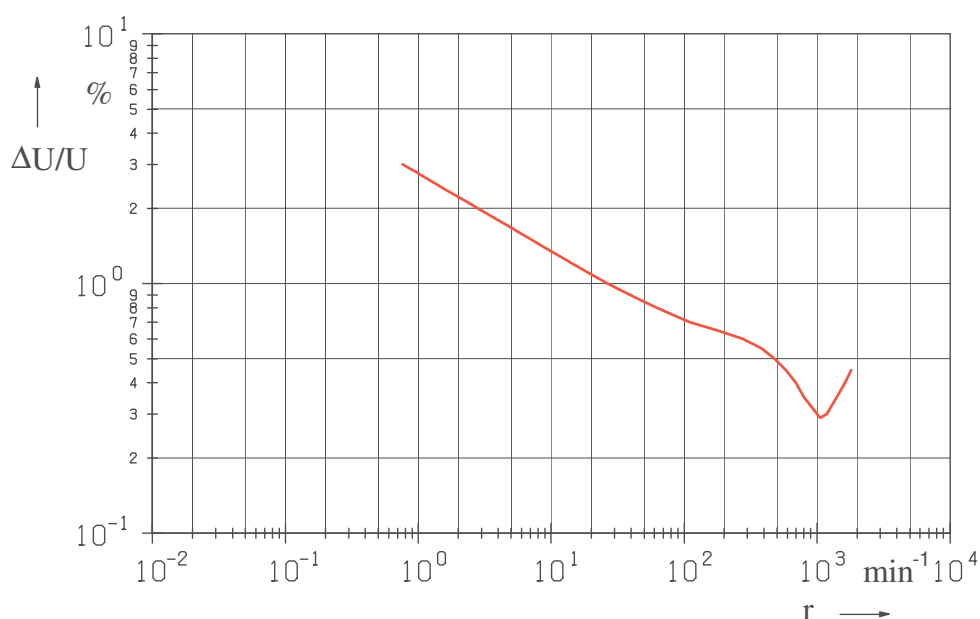


CENELEC-Kurve (Flickerkurve)

Helligkeitsschwankungen (60W-Glühlampe) werden als „störend“ empfunden → Beschwerde

Abhängig von

- der Kurvenform,
- der Wiederholrate und
- der Höhe der (periodischen) Spannungsschwankung,
z.B.: rechteckförmig, $f_F = 8,8 \text{ Hz}$, $\Delta U/U = 0,29 \%$



CENELEC-Kurve (Personenversuche)
rechteckförmige Spannungsschwankung

**Definition:**

Flicker ist der subjektive Eindruck von Leuchtdichteänderungen.

Ursache: Zeitliche Änderung des Effektivwertes der Versorgungsspannung

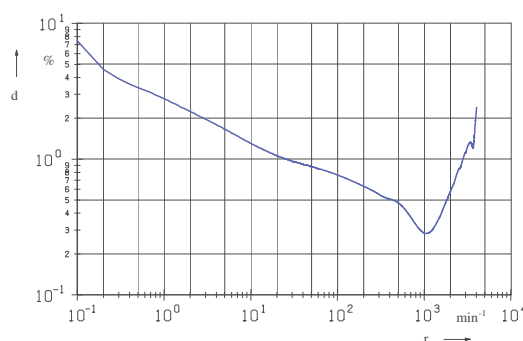


Spannungsschwankung $\Delta U/U$

Wirkung: Helligkeitsschwankungen in Beleuchtungseinrichtungen

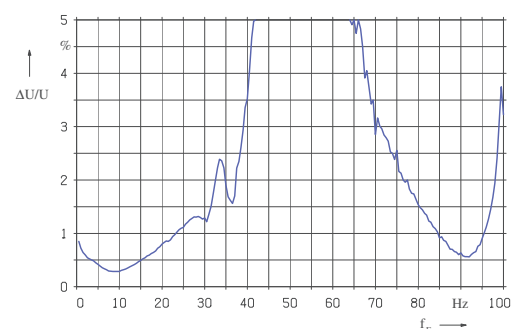
Messung: Flickermeter $\rightarrow$ Flickerstärke P_{st}

- Die Flickerstärke gibt die Störwirkung von Flicker an
- Für alle Wertepaare der CENELEC-Kurve $\rightarrow P_{st} = 1,0$

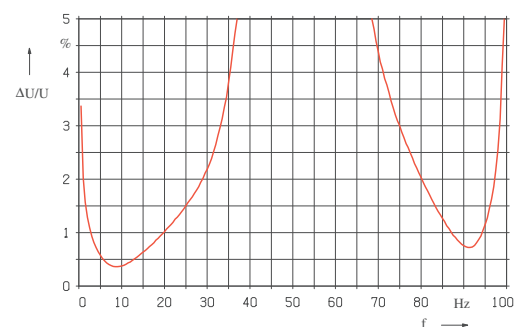


$(P_{st}=1)$ -Kurve
d(t) rechteckförmig

$(P_{st}=1)$ -Kurve, d(t) sinusförmig



$(P_{st}=1)$ -Kurve d(t) rechteckförmig



**Eigenschaften:**

- proportional zu $\Delta U/U$
- proportional zu $\sqrt[3]{r}$

Beobachtungsdauer:

- Kurzzeit: $T_{\text{kurz}} = 1, 10 \text{ min} \rightarrow P_{\text{st}}$ (Kurzzeit-Flickerstärke)
- Langzeit: $T_{\text{Lang}} = N \cdot 10 \text{ min} \rightarrow P_{\text{lt}}$ (Langzeit-Flickerstärke)

Summationseffekt

$$P_{\text{st,g}} = \sqrt[\alpha]{\sum_{i=1}^N P_{\text{st,i}}^\alpha}$$

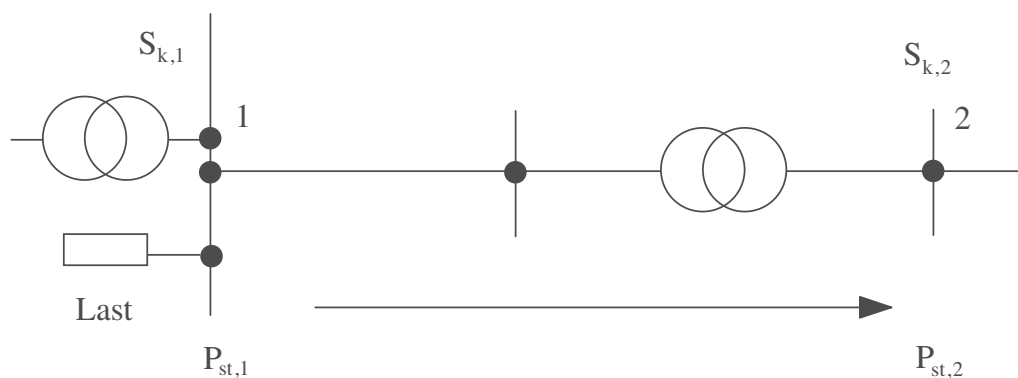
(für unabhängige Flickerquellen
 α ist von mehreren Parametern abhängig
 In den Normen meist $\alpha = 3$ (3,2))



- **Niederspannungsnetz**
 - Beurteilung der Außenleiter/Neutralleiter-Spannung
- **Mittel-/Hochspannungsnetz**
 - Beurteilung der verketteten Spannung
 - Anschluß über vorhandene Wandler

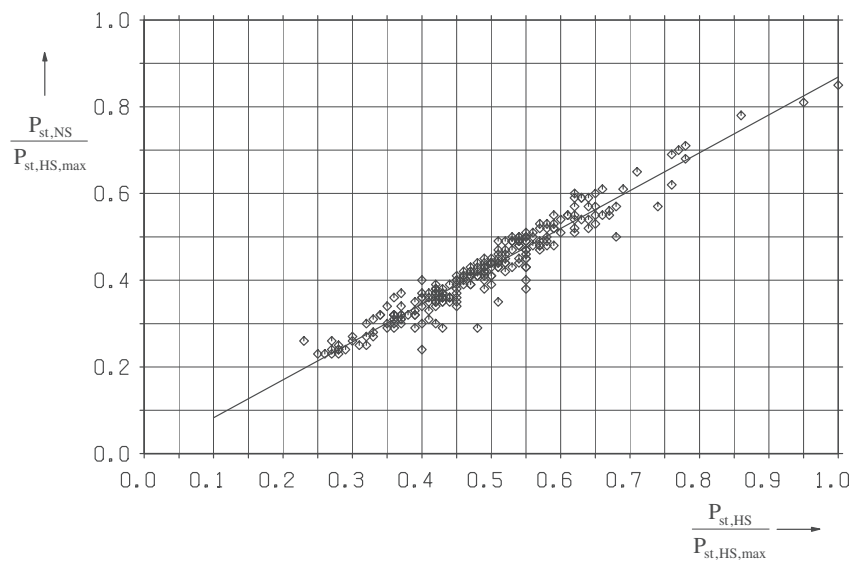


- Spannungsschwankungen und Flicker breiten sich im gesamten Netz aus, sowohl in über- als auch in untergeordneter Richtung.
- Aktive Elemente, z.B. Motoren, Generatoren, die zur Kurzschlußleistung beitragen wirken flickerdämpfend.
- Die in einer höheren Spannungsebene vorhandenen Flickerwerte werden mit einer gewissen Dämpfung in die Teile des Netzes mit einer niedrigeren Spannung übertragen.
- Spannungsschwankungen im Hoch- und Mittelspannungsnetz sind daher unmittelbar als Spannungsschwankungen im Niederspannungsnetz zu registrieren.

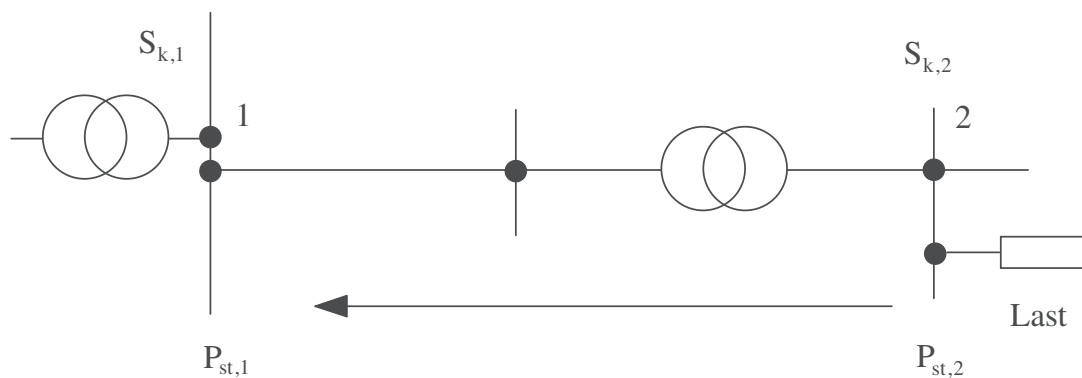


Flicker - Abwärtstransfer

$$P_{st,2} = T_{Pst,12} P_{st,1} < P_{st,1}$$



Bestimmung des Transferkoeffizienten: $T_{Pst,HN} = 0,87$ Regressionsgrade
 $P_{st,NS} = -0,0042 + 0,8727 P_{st,HS}$ (250 Daten)

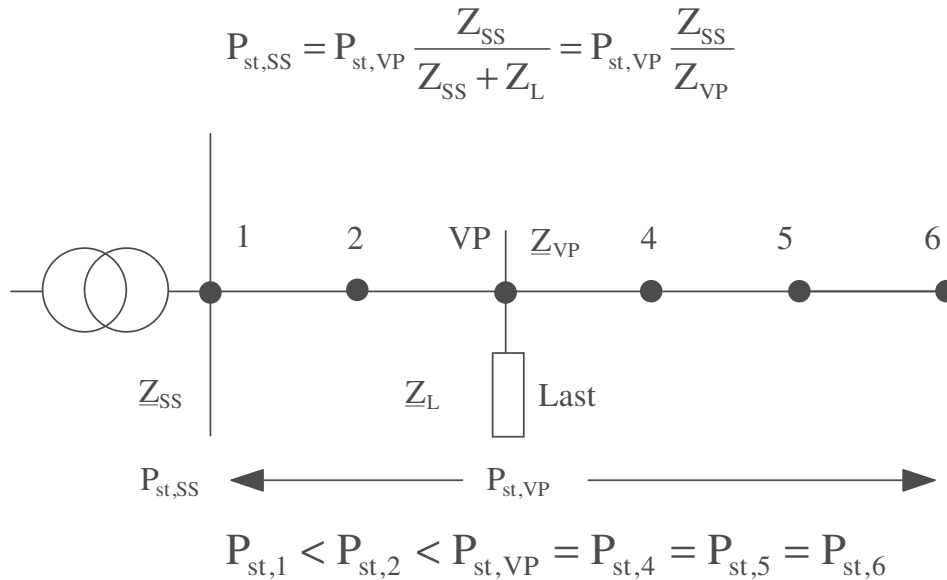


Flicker - Aufwärtstransfer

$$P_{st,1} = T_{Pst,21} P_{st,2} \ll P_{st,2}, P_{st,1} \approx 0$$



In einem Strahlennetz mit passiven Lasten wird die Flickerstärke in Aufwärtsrichtung reduziert



Anwendungsbereich

- Für neu anzuschließende EZA
- Für bestehende EZA, an denen wesentliche Änderungen durchgeführt wurden (z.B. Repowering)
- Anzuwenden ab 1. Januar 2009
- Anforderungen an die dynamische Netzstützung ab 1. Januar 2010

Tabelle 1: Übersicht der Übergangsfristen

Technische Anforderung	Einzuhalten spätestens ab:	
	Photovoltaikanlagen / Brennstoffzellenanlagen	Erzeugungsanlagen mit Verbrennungskraftmaschinen
Statische Spannungshaltung	01.07.2010	01.01.2010
Dynamische Netzstützung (eingeschränkt)	01.07.2010	bis 01.01.2011 keine Anforderung an dynamische Netzstützung
Dynamische Netzstützung (komplett)	01.01.2011	
Zertifizierungspflicht	01.07.2010	01.01.2010

Auch hierbei gilt das Datum, zu dem die vollständigen Antragsunterlagen beim Netzbetreiber vorliegen.



- DIN EN 50160
- BDEW: Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz 2008
- Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen (D-A-CH-CZ), BDEW 2007
- Technische Anschlussbedingungen Mittelspannung BDEW, Netzbetreiber
- Technische Richtlinie FGW TR3, TR4, TR8



- Datenblatt mit den technischen Daten der EZA
- Angaben über die Kurzschlussfestigkeit der Betriebsmittel in der EZA
- Elektrische Daten des Kundentransformators zur Netzanbindung
- Kurzschlussstrom der EZA (einschl. zeitlichem Verlauf) am Übergabepunkt
- Beschreibung der Art und Betriebsweise von Antriebsmaschine, Generator, Umrichter und Art der Zuschaltung zum Netz (Datenblätter, Prüfprotokolle)
- Nachweis der elektr. Eigenschaften (Zertifizierung)

**Nachweis der elektrischen Eigenschaften**

- **Einheitenzertifikat nach FGW TR8**

- Messung nach FGW TR3
- Modellbildung nach FGW TR4
- Modellvalidierung nach FGW TR4

- **Anlagenzertifikat nach FGW TR8**

- Einheitenzertifikat
- Simulation
 - Validiertes Modell nach FGW TR4
 - Windparkmodell
 - Netzdaten, Windparkdaten

(Anlagenzertifikat für EZA > 1MVA oder mehr als 2km Kabellänge)



- Impedanz des Netzes am Verknüpfungspunkt (Kurzschlussleistung, Resonanz)
- Anschlussleistung
- Art und Betriebsverhalten der EZA
- Sofern mehrere EZA im gleichen MS-Netz angeschlossen sind, muss die Gesamtwirkung betrachtet werden
- Die Beurteilung von Netzurückwirkungen erfolgt am Verknüpfungspunkt (V) Der Anschlussanlage am nächsten gelegene Stelle im Netz der allgemeinen Versorgung, an der weitere Anschlussnehmer angeschlossen sind oder angeschlossen werden können



EZA speisen in das Netz ein

- Spannungsanhebung
- bei verteilten Anlagen im Netz verändert sich das gesamte Spannungsprofil

Spannungsänderung bei einer Einzelanlage

$$\Delta u_{aV} = \frac{S_{Amax} \cdot (R_{kV} \cos|\phi| \mp X_{kV} \sin|\phi|)}{U^2}$$

Vorzeichen bei Wirkleistungseinspeisung (-P) im VZS

- bei Bezug induktiver Blindleistung (untererregt) negativ
- bei Bezug kapazitiver Blindleistung (übererregt) positiv



Im ungestörten Betrieb des Netzes darf der Betrag der von **allen** Erzeugungsanlagen mit Anschlusspunkt in einem Mittelspannungsnetz verursachten Spannungsänderung an **keinem** Verknüpfungspunkt in diesem Netz einen Wert von 2 % gegenüber der Spannung ohne Erzeugungsanlagen überschreiten.

Bedingung: $\Delta u_a \leq 2 \%$

Lastflußberechnung erforderlich !



Anschlussbeurteilung für Oberschwingungen

- zunächst für ind. Netz (keine Resonanz), Kurzschlussimpedanz
 - zul. OS-Ströme
- Falls erforderlich zusätzliche Resonanzbetrachtungen, Oberschwingungsimpedanz
- Bei nur **einer** Erzeugungsanlage an V, **ein** Verknüpfungspunkt

$$I_{V\text{ zul}} = i_{V\text{ zul}} \cdot S_{kV}$$

$I_{V\text{ zul}}$	zulässiger Oberschwingungsstrom
$i_{V\text{ zul}}$	zulässiger bezogener Oberschwingungsstrom
S_{kV}	Netzkurzschlussleistung an V



- Bei **mehreren** Erzeugungsanlagen an V, **ein** Verknüpfungspunkt

$$I_{V\text{ Azul}} = I_{V\text{ zul}} \cdot \frac{S_A}{S_{\text{Gesamt}}} = i_{V\text{ zul}} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_A}{S_{\text{Gesamt}}}$$

$I_{V\text{ Azul}}$	zulässiger Oberschwingungsstrom einer EZA
$i_{V\text{ zul}}$	zulässiger bezogener Oberschwingungsstrom
S_{kV}	Netzkurzschlussleistung an V
S_A	Anschlussscheinleistung dieser Anlage
S_{Gesamt}	insgesamt anschließbare oder geplante Einspeiseleistung am betrachteten Verknüpfungspunkt

Bei Erzeugungsanlagen, die aus Erzeugungseinheiten gleichen Typs bestehen, kann $S_A = \sum S_{rE}$ gesetzt werden.



- Bei *mehreren* Erzeugungsanlagen an V, *mehrere* Verknüpfungspunkte im MS-Netz

Bei mehreren Verknüpfungspunkten in einem Mittelspannungsnetz müssen bei der Beurteilung der Verhältnisse an einem Verknüpfungspunkt auch **alle anderen** Verknüpfungspunkte in die Betrachtung einbezogen werden.

Danach sind die Verhältnisse in einem Mittelspannungsnetz als zulässig zu betrachten, wenn an **jedem** Verknüpfungspunkt der eingespeiste Oberschwingungsstrom folgenden Wert nicht überschreitet:



- Zulässiger Oberschwingungsstrom

$$I_{V\,zul} = i_{V\,zul} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_{Gesamt}}{S_{Netz}}$$

Für Oberschwingungen oberhalb der 13. Ordnung gilt

$$I_{V\,zul} = i_{V\,zul} \cdot S_{kV} \cdot \sqrt{\frac{S_{Gesamt}}{S_{Netz}}}$$

S_{Gesamt} Summe der Einspeisescheinleistungen aller Erzeugungsanlagen an diesem Verknüpfungspunkt

S_{Netz} Leistung des einspeisenden Netztransformators im UW



- Umrichter mit Taktfrequenzen größer 1 kHz

Für Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis und Taktfrequenzen größer 1 kHz gilt für Oberschwingungen oberhalb der 2. Ordnung

$$I_{v\text{ zul}} = i_{v\text{ zul}} \cdot S_{kV} \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{Gesamt}}}{S_{\text{Netz}}}}$$

S_{Gesamt} Summe der Einspeisescheinleistungen aller Erzeugungsanlagen an diesem Verknüpfungspunkt
 S_{Netz} Leistung des einspeisenden Netztransformators



Ordnungszahl v, μ	Zulässiger, bezogener Oberschwingungsstrom $i_{v,\mu\text{ zul}}$ in A/MVA		
	10-kV-Netz	20-kV-Netz	30-kV-Netz
5	0,058	0,029	0,019
7	0,082	0,041	0,027
11	0,052	0,026	0,017
13	0,038	0,019	0,013
17	0,022	0,011	0,07
19	0,018	0,009	0,006
23	0,012	0,006	0,004
25	0,010	0,005	0,003
$25 < v < 40$ ¹⁾	$0,01 \times 25/v$	$0,005 \times 25/v$	$0,003 \times 25/v$
geradzahlig	$0,06/v$	$0,03/v$	$0,02/v$
$\mu < 40$	$0,06/\mu$	$0,03/\mu$	$0,02/\mu$
$\mu, v > 40$ ²⁾	$0,18/\mu$	$0,09/\mu$	$0,06/\mu$

Auf die Netzkurzschlussleistung bezogenen zulässigen Oberschwingungsströme, die insgesamt in das Mittelspannungsnetz eingespeist werden dürfen.

1) ungeradzahlig

2) Ganzzahlig u. nicht ganzzahlig innerhalb einer Bandbreite v 200 Hz. Messung gem. EN 61000-4-7, Anhang B



- **Netzgeführte Wechselrichter (6- oder 12-pulsig)**

Die stromrichtertypischen Oberschwingungsströme (5., 7., 11., 13...) sowie nichttypische sehr niedriger Ordnung ($n < 13$) werden arithmetisch addiert:

$$I_v = \sum_{i=1}^n I_{v,i}$$

Für die nicht typischen Oberschwingungen höherer Ordnung ($n \geq 13$):

$$I_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{v,i}^2}$$



- **Pulsmodulierte Wechselrichter**

Für eine Ordnungszahl μ , die grundsätzlich nicht-ganzzahlig ist, aber für Werte von $\mu \geq 13$ auch ganzzahlige Werte mit einschließt, ist der gesamte Strom gleich der Wurzel aus der Summe der Quadrate der Ströme der Erzeugungseinheiten:

$$I_\mu = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{\mu,i}^2}$$

Oberschwingungsströme oberhalb der 2. Ordnung sowie Zwischenharmonische dürfen gemäß (vorstehender) Gleichung berechnet werden, wenn die Pulsfrequenz des Wechselrichters mindestens 1 kHz beträgt.

Treten untypische Oberschwingungsströme bei ganzzahligen Ordnungszahlen von $n < 13$ auf, dann sind diese Ströme arithmetisch zu addieren.

**Beurteilung der Rückwirkungsströme**

Die Einhaltung der zulässigen Rückwirkungsströme kann durch Messung des Gesamtstromes am Verknüpfungspunkt

oder

durch Berechnung aus den Strömen der angeschlossenen Erzeugungseinheiten nachgewiesen werden

Einheitenzertifikat (TR3)



Wenn die nach der hier vorgestellten Methode ermittelten zulässigen Oberschwingungsströme von den anzuschließenden Anlagen eingehalten werden, dann ist mit ausreichend hoher Wahrscheinlichkeit sichergestellt, dass die zulässigen Oberschwingungsspannungen im Netz nicht überschritten werden.

Anderenfalls sind genauere Rechnungen erforderlich, bei denen die Netzverhältnisse im einzelnen nachgebildet und bereits vorhandene oder noch zu erwartende Oberschwingungserzeuger berücksichtigt werden.



Ordnungszahl	Zulässige OS-Spannung im MS-Netz [% U_n]
5	0,5
7	1
11	1
13	0,85
17	0,65
19	0,6
23	0,5
25	0,4
$25 < v < 40$ ¹⁾	0,4
geradzahlig	0,1
$\mu < 40$	0,1
$\mu, v > 40$ ²⁾	0,3

Maximale Oberschwingungs-
spannungsanteile, die durch alle
Erzeugungsanlagen in einem
galvanisch verbundenen
Mittelspannungsnetz
erzeugt werden dürfen.

1) ungeradzahlig 2) Meßbandbreite 200 Hz



- **statische Spannungsstützung**

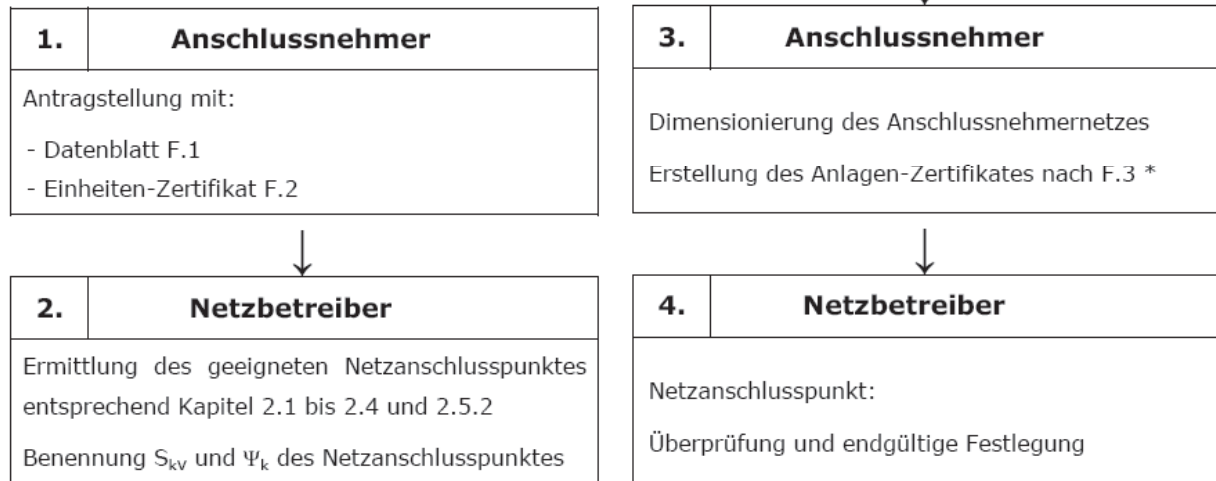
- Blindleistungsregelung
- $\cos\phi(P)$ Vorgabe

- **dynamische Netzstützung**

- Spannungshaltung bei Spannungseinbrüchen
 - EZA müssen Blindstrom einspeisen (Transmission Code 2007)
- Netzfehler
 - EZA dürfen sich nicht vom Netz trennen
 - EZA müssen Blindstrom einspeisen
 - Nach Fehlerklärung dürfen EZA nicht mehr induktive Blindleistung entnehmen, als vor dem Fehler (alle Arten von Kurzschlüssen)



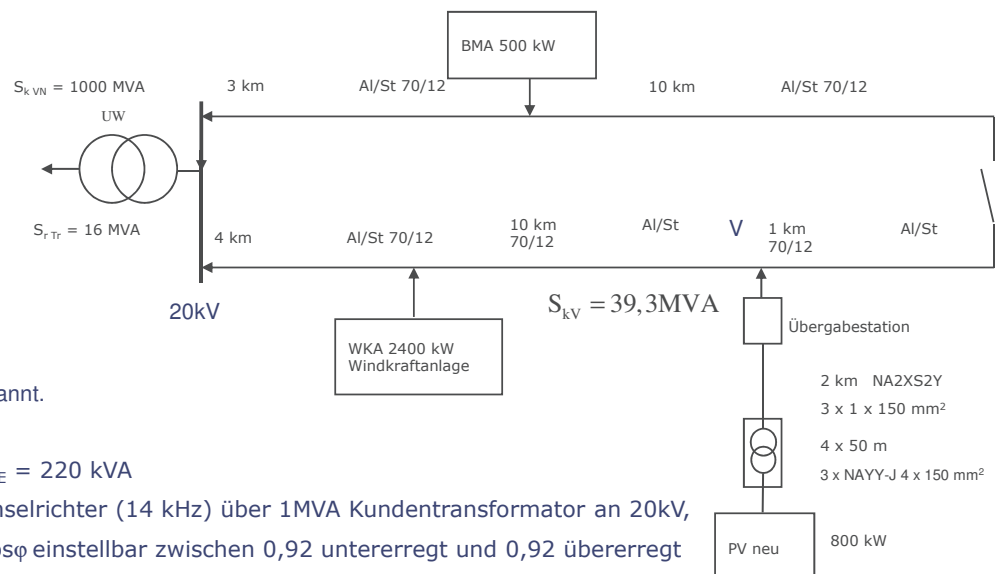
Anschlussbeurteilung (Workflow)



* Entfällt für Erzeugungsanlagen mit einer Anschlussscheinleistung S_A von ≤ 1 MVA und einer Länge der Anschlussleitung vom Netzanschlusspunkt bis zu der/den Erzeugungseinheit(en) von ≤ 2 Kilometern.



Anschluss einer 800-kW-Photovoltaik-Anlage



Alle Impedanzen sind bekannt.

4 PV-Module (400V) $S_{rE} = 220$ kVA

4 Selbstgeführter Wechselrichter (14 kHz) über 1MVA Kundentransformator an 20kV,
Verschiebungsfaktor $\cos\phi$ einstellbar zwischen 0,92 untererregt und 0,92 übererregt



Festlegungen des Netzbetreibers zum Netzanschluss

Bei dem Netz handelt es sich um ein Landnetz, an dem weitere Erzeugungsanlagen erwartet werden. Um das Netz optimal auszulasten, sollen sich alle neuen Erzeugungsanlagen an der **statischen** Spannungsstützung beteiligen.

Eine dynamische Netzstützung wird vorerst nicht vorgesehen.

Die **statische** Spannungsstützung soll mit einer $\cos\varphi(P)$ -Kennlinie realisiert werden.

Die $\cos\varphi(P)$ -Kennlinie wird vom Netzbetreiber vorgegeben.

Hierzu muss die Erzeugungsanlage so betrieben werden können, dass der Verschiebungsfaktor am Netzanschlusspunkt zwischen

$$0,95_{\text{untererregt}} \leq \cos \varphi \leq 1$$

eingestellt werden kann.



Überprüfung der zulässigen Spannungsänderung

Da die Spannung an der Sammelschiene des UW als konstant angenommen wird, werden für das Kriterium „Spannungsänderung“ nur die Impedanzen im MS-Netz (Leitung) berücksichtigt:

$$X_{\text{kV, MS}} = 4,83 \, \Omega \quad R_{\text{kV, MS}} = 5,78 \, \Omega \quad Z_{\text{kV, MS}} = 7,53 \, \Omega$$

Bei einem Verschiebungsfaktor $\cos\varphi = 1$, ergibt sich eine Spannungsänderung am Verknüpfungspunkt der PV-Anlage von:

$$\Delta u_a = \frac{S_{A_{\max}} \cdot (R_{\text{kV}} \cdot \cos|\varphi| - X_{\text{kV}} \cdot \sin|\varphi|)}{U^2} = \frac{800 \text{ kVA} \cdot (5,78 \Omega \cdot 1)}{(20 \text{ kV})^2} = 1,16 \%$$



Beispiel – PV-Anlage - Spannungsänderung

Bei einem Verschiebungsfaktor $\cos\phi = 1$, ergibt sich eine Spannungsänderung der WKA ($P_{AV} = 2,4 \text{ MW}$) am Verknüpfungspunkt WKA

$$\text{WKA: } X_{kV, WKA} = 1,38 \, \Omega \quad R_{kV, WKA} = 1,65 \, \Omega \quad Z_{kV, WKA} = 2,15 \, \Omega$$

$$\Delta u_a = \frac{S_{A \max} \cdot (R_{kV} \cdot \cos|\phi| - X_{kV} \cdot \sin|\phi|)}{U^2} = \frac{2400 \text{ kVA} \cdot (1,65 \Omega \cdot 1)}{(20 \text{ kV})^2} = 0,99 \%$$



Beispiel – PV-Anlage - Spannungsänderung

Die maximale Scheinleistung der Erzeugungsanlage ergibt sich bei einem Verschiebungsfaktor von $\cos\phi = 0,95$ untererregt zu $800/0,95 = 842 \text{ kVA}$

Für den untererregten Betrieb wird eine Spannungsänderung am Verknüpfungspunkt der PV-Anlage von:

$$\begin{aligned} \Delta u_a &= \frac{S_{A \max} \cdot (R_{kV} \cdot \cos|\phi| - X_{kV} \cdot \sin|\phi|)}{U^2} \\ &= \frac{842 \text{ kVA} \cdot (5,78 \Omega \cdot 0,95 - 4,83 \Omega \cdot 0,31)}{(20 \text{ kV})^2} = 0,84 \% \end{aligned}$$

ermittelt. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Windkraftanlage und der geplanten Photovoltaik-Anlage ergibt sich durch Überlagerung der Spannungsänderungen beider Anlagen eine Spannungsänderung, wie in Tabelle D.1-1 dargestellt.



Beispiel – PV-Anlage - Spannungsänderung

	Spannungsänderung in %	
	VP WKA	VP PV
WKA ($\cos \varphi = 1$)	0,99	0,99
PV neu (0,95 untererregt)	$(4/14)0,84=0,24$	0,84
Summe	1,23	1,83

(Abwärtstransfer)

(Aufwärtstransfer)

Es ergibt sich eine Spannungsanhebung von 1,83 %, der Anschluss ist also **zulässig**.

Tabelle D.1-1: Spannungsänderung an den einzelnen Verknüpfungspunkten.



Beispiel – PV-Anlage – statische Spannungsstützung

Zur individuellen Festlegung der $\cos\varphi(P)$ -Kennlinie muss mindestens noch ein weiterer Punkt der Kennlinie berechnet werden. Die Kennlinie wird so festgelegt, dass die Spannungsanhebung konstant ist. Das bedeutet, es ergibt sich für jeden Verschiebungsfaktor eine maximal mögliche Einspeisung, z.B.:

$$\cos \varphi = 1 : P_{A \max} = \frac{\cos \varphi \cdot \Delta u_a \cdot U^2}{(R_{kV} \cdot \cos \varphi - X_{kV} \cdot \sin \varphi)} = \frac{0,0084 \cdot (20 \text{ kV})^2}{5,78 \Omega} = 580 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi = 0,95 : P_{A \max} = \frac{\cos \varphi \cdot \Delta u_a \cdot U^2}{(R_{kV} \cdot \cos \varphi - X_{kV} \cdot \sin \varphi)} = \frac{0,95 \cdot 0,0084 \cdot (20 \text{ kV})^2}{(5,78 \cdot 0,95 - 4,83 \cdot 0,31) \Omega} = 800 \text{ kW}$$

$$\cos \varphi = 0,98 : P_{A \max} = \frac{\cos \varphi \cdot \Delta u_a \cdot U^2}{(R_{kV} \cdot \cos \varphi - X_{kV} \cdot \sin \varphi)} = \frac{0,98 \cdot 0,0084 \cdot (20 \text{ kV})^2}{(5,78 \cdot 0,98 - 4,83 \cdot 0,2) \Omega} = 700 \text{ kW}$$



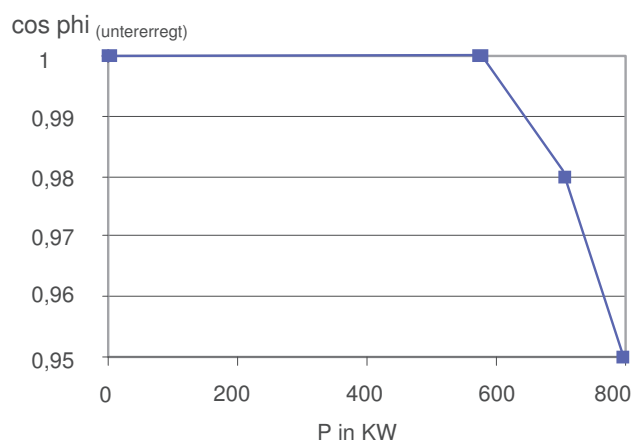
Es ergeben sich folgende Kennlinienpunkte:

cos φ (nur PV-Anlage)	Spannungsänderung PV + WKA (nur PV) in %		
	VP WKA	VP PV	P_{Amax}/kW
0,95 untererregt	1,23 (0,24)	1,83 (0,84)	800
0,98 untererregt	1,23 (0,24)	1,83 (0,84)	700
1	1,23 (0,24)	1,83 (0,84)	580

Tabelle D.1-2: Spannungsänderung an den einzelnen Verknüpfungspunkten.



Aus Tabelle D.1-2 ergibt sich folgende Kennlinie:



cos φ (P)-Kennlinie

Die dargestellte Kennlinie muss in den Wechselrichtern hinterlegt werden.



Ordnungszahl	i_{vzul}	I_{vAzul}	$(I_v/I_r)_{WR}$ Zertifikat (TR3)	I_{vWR}	$I_{vPV-Anlage}$
v	A/MVA	A	%	A	A
Ungerade					
5	0,029	0,267	0,4	0,026	0,052
7	0,041	0,378	0,65	0,042	0,084
11	0,026	0,239	0,3	0,019	0,038
13	0,019	0,175	0,3	0,019	0,038
17	0,011	0,221	0,15	0,01	0,02
19	0,009	0,175	0,1	0,006	0,012
23	0,006	0,119	-	-	-
Gerade					
2	0,015	0,032	0,1	0,006	0,024
4	0,008	0,074	0,05	0,003	0,006
6	0,005	0,046	0,05	0,003	0,006

$$S_A = S_{Gesamt} = 0,88 \text{ MVA}$$

$$S_{Netz} = S_{rT} = 16 \text{ MVA}$$

$$S_{kV} = 39,3 \text{ MVA}$$

$$I_{vzul} = i_{vzul} \cdot S_{kV} \cdot \sqrt{\frac{S_{Gesamt}}{S_{Netz}}} \quad v > 2$$

$$I_r = \frac{S_{rE}}{\sqrt{3} U_n} = \frac{220 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 20 \text{ kV}} = 6,35 \text{ A}$$

Summation: quadratisch $v > 2$

Selbstgeführter WR ($f_T > 1 \text{ kHz}$):

Vergleich der nach Richtlinie für die PV-Anlage zulässigen mit den sich aus dem Einheiten-Zertifikat ergebenden Einspeise-Oberschwingungsströmen



Als abschließende Beurteilung wird entschieden, die Oberschwingungen und Zwischenharmonische im Einspeisestrom als zulässig zu bewerten.

Entscheidung über den Anschluss

Der Anschluss der 800-kW-Photovoltaik-Anlage an das ländliche 20-kV-Netz kann zugelassen werden, wenn die Erzeugungsanlage mit einem Verschiebungsfaktor einspeist, der der vorgegebenen $\cos\phi(P)$ -Kennlinie entspricht.