



# HANDBUCH POWER-QUALITY

Autor: Peter Riese

$$P = \left( \frac{10 \cdot f_n}{f_r} \right)^2$$

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} U_n^2}}{U_1}$$

$$Q_C = C \cdot 3 \cdot U^2 \cdot \omega$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$\sqrt{3}$

**Information • Tabellen • Formeln**

zum Thema Blindleistungs-Kompensation und  
Netzqualität für Planer und Anwender

## **Führende Technologie für sichere Netzlösungen**

Das Ziel von FRAKO sind Lösungen, die optimal auf die Anforderungen unserer Kunden ausgelegt sind. Dafür nutzen wir unsere gesammelte Erfahrung und unser Know-how in der Entwicklung und Produktion. Die Funktionssicherheit unserer Produkte ist international ebenso bekannt, wie unsere Zuverlässigkeit bei der Entwicklung neuer Lösungen.

Jeder Bereich, jede Leistung, jede Handlung unseres Unternehmens wird von Qualität geprägt. Daraus resultiert die bekannte FRAKO Produktqualität ebenso wie unsere Beratungs- und Servicequalität. Zuverlässigkeit, Termintreue und Klarheit besitzen für uns den gleichen Stellenwert wie Haltbarkeit und Leistungsstärke. Deshalb ist FRAKO inzwischen auf der ganzen Welt führend in seinen Geschäftsfeldern:

- Hochwertige Kondensatoren
- Individuelle Blindleistungs-Kompensationsanlagen
- Effiziente Power-Quality-Lösungen
- Intelligente Energie-Management-Systeme
- Zuverlässige Dienstleistungen und Services

Unsere Kunden und Partner wissen: FRAKO – das bedeutet Qualität und Qualität bedeutet Sicherheit. Dadurch können wir die Verantwortung für die Funktionalität, Rentabilität und Umweltverträglichkeit unserer Lösungen übernehmen sowie die Sicherheit für Mensch und Maschine gewährleisten. Wir sind in der Lage, höchste Ansprüche zu erfüllen und innovative Lösungen nach individuellen Anforderungen zu entwickeln.

Unsere hervorragend ausgebildeten und motivierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter besitzen die fachliche Kompetenz und das fundierte Know-how für die erfolgreiche Projektierung neuer Anlagen. Und auch wir selbst achten ganz besonders auf den sparsamen und rationellen Einsatz von Energie bei der Herstellung und beim Betrieb unserer Produkte. Wir überwachen unseren Energieverbrauch und die entstehenden Emissionen kontinuierlich mit unserem eigenen Energie-Management-System und sorgen dafür, dass wir die höchste Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit erreichen.

Für die Zukunft haben wir uns vorgenommen, weiterhin intensiv daran zu arbeiten, unsere führende Position zu festigen, und das Vertrauen unserer Kunden in den Bereichen Spannungsqualität, Energiekosten-Optimierung und Energieeffizienz zu rechtfertigen.

Unsere Produktqualität und unser Anwendungs-Know-How sind die Basis für den optimalen Nutzen unserer Produkte bei unseren Kunden. Mit dem vorliegenden Handbuch für den interessierten Leser möchten wir die technischen Grundlagen, unsere Herstellungs-Philosophie und unsere Motive dokumentieren. Es soll das Basiswissen für die Auswahl, Installation und Anwendung unserer Kompensations- und Power Quality-Systeme vermitteln.

Teningen im Oktober 2020

Dr. Matthias Sehmsdorf  
Geschäftsführer

# Inhalt

## Kapitel 1: Grundlagen

■ Wirkleistung/Wirk- und Blindleistung. . . . .	4
■ Blindleistung/Scheinleistung/Leistungsfaktor ( $\cos \varphi$ ) . . . . .	5
■ Warum wird kompensiert? . . . . .	6

## Kapitel 2: Kompensationsarten

■ Einzelkompensation . . . . .	7
■ Gruppenkompensation . . . . .	7
■ Zentralkompensation . . . . .	8
■ Gemischte Kompensation . . . . .	8

## Kapitel 3: Ermittlung der Kondensatorleistung

■ Stromtarife/Überschlägige Schätzung/Auflisten von Verbrauchern . . . . .	9
■ Ermittlung der erforderlichen Kondensatorleistung durch Messung . . . . .	9
■ Ermittlung aus der Stromrechnung . . . . .	13

## Kapitel 4: Anwendungen

■ Kompensation von Entladungslampen / Auswahltablelle . . . . .	14
■ Einzelkompensation von Transformatoren/Motoren . . . . .	16
■ Blindleistungs-Regelanlagen . . . . .	20

## Kapitel 5: Leistungsmerkmale

■ Leistungs-Kondensatoren . . . . .	21
■ Blindleistungsregler . . . . .	24

## Kapitel 6: Installation

■ Stromwandler. . . . .	26
■ Sicherungen und Kabel . . . . .	27
■ Schutzart . . . . .	29

## Kapitel 7: Berechnungsformeln

■ . . . . .	30
-------------	----

## Kapitel 8: Power-Quality

■ Was sind Oberschwingungen? . . . . .	32
■ Wie entstehen Oberschwingungen? . . . . .	34
■ Welchen Einfluss hat eine Kompensation in einem Netz mit Oberschwingungen? . . . . .	35
■ Wann können gefährliche Netzresonanzen auftreten? . . . . .	36
■ Einfluss der Netzkonfiguration auf die Oberschwingungsproblematik. . . . .	37

## Kapitel 9: Projektierung in Netzen mit Oberschwingungen

■ Projektierung von Kompensationsanlagen in Netzen mit Oberschwingungen . . . . .	38
■ Maßnahmen gegen das Auftreten von Resonanzen . . . . .	39
■ Oberschwingungsgrenzwerte . . . . .	41

## Kapitel 10: Projektierung in Netzen mit Tonfrequenz-Rundsteueranlagen

■ Einfluss von nicht verdrosselten Kompensationsanlagen . . . . .	42
■ Einfluss von verdrosselten Kompensationsanlagen . . . . .	43
■ Ausführungen von verdrosselten Kompensationsanlagen. . . . .	44
■ Überwachung der Kompensationsanlagen im Betrieb . . . . .	45

## Kapitel 11: Power-Quality Messungen und Analysen

■ . . . . .	46
-------------	----

## Kapitel 12: Oberschwingungs-Filtersysteme

■ Passive Filtersysteme . . . . .	51
■ Aktive Filtersysteme . . . . .	52

## Kapitel 13: Fachbeiträge

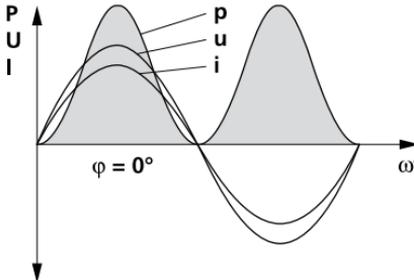
■ Aktive Filter (stromgeführt) „Aktivität Oberschwingungen“ . . . . .	53
■ Aktive Filter (spannungsgeführt) „Spannungsgeführte Aktivfilter bei Notstrombetrieb“ . . . . .	57
■ Induktive Kompensation „Blindstromkompensation bei Solarparks“ . . . . .	59

# Kapitel 1: Grundlagen

Bevor auf Einzelheiten zur Projektierung von Blindleistungs-Regelanlagen näher eingegangen wird, sollen einige Grundkenntnisse der Wechselstromtechnik aufgefrischt werden.

## ■ 1.1: Wirkleistung

Mit rein ohmscher Belastung, ohne induktive oder kapazitive Komponenten, z.B. bei einer elektrischen Heizung, decken sich die Nulldurchgänge von Spannungs- und Stromkurve (Bild 1). Spannung und Strom sind in „Phase“. Aus dem Produkt der Augenblickswerte von Spannung ( $U$ ) und Strom ( $I$ ) lässt sich die Leistungskurve ( $P$ ) berechnen. Sie hat doppelte Netzfrequenz und verläuft voll im positiven Bereich, da auch das Produkt zweier negativer Zahlen positiv ist.



**Bild 1:** Spannung, Strom und Leistung bei rein ohmscher Belastung ( $\varphi = 0^\circ$ )

In unserem Fall:  $(-U) \cdot (-I) = (+P)$

„Wirkleistung ist der in nichtelektrische Form (z.B. Wärme, Licht, mechanische Leistung) umgewandelte und vom Zähler registrierte Teil der Leistung“. Bei rein ohmscher Belastung wird sie aus dem Produkt der Effektivwerte von Spannung [ $U$ ] und Strom [ $I$ ] berechnet:

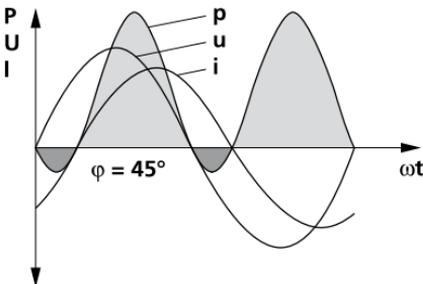
$$P = U \cdot I$$

[M] [M] [A]

## ■ 1.2: Wirk- und Blindleistung

In der Praxis tritt meist keine rein ohmsche Last auf, sondern es kommt zusätzlich eine induktive Komponente hinzu. Dies gilt für alle Verbraucher, die zur Funktion ein magnetisches Feld benötigen, z. B. Asynchronmotoren, Drosselspulen und Transformatoren. Auch Stromrichter benötigen zur Kommutierung Blindleistung. Der zum Aufbau und Umpolen des magnetischen Feldes benutzte Strom verbraucht sich nicht, sondern pendelt als Blindstrom zwischen Generator und Verbraucher hin und her.

Wie in Bild 2 gezeigt, decken sich die Nulldurchgänge von Spannung und Strom nicht mehr. Es tritt eine Phasenverschiebung auf. Bei induktiver Last eilt der Strom der Spannung nach, bei kapazitiver Last eilt der Strom der Spannung voraus. Berechnet man jetzt nach  $(U) \cdot (I) = (P)$  die Augenblickswerte der Leistung, so



**Bild 2:** Spannung, Strom und Leistung bei ohmscher und induktiver Last ( $\varphi = 45^\circ$ )

erhält man immer dann negative Werte, wenn einer der beiden Faktoren negativ wird.

Als Beispiel wurde eine Phasenverschiebung von  $\varphi = 45^\circ$  gewählt. Dies entspricht einem  $\cos \varphi$  von 0,707 ind. Die Leistungskurve verläuft zum Teil im negativen Bereich. Die Wirkleistung errechnet sich nun aus:

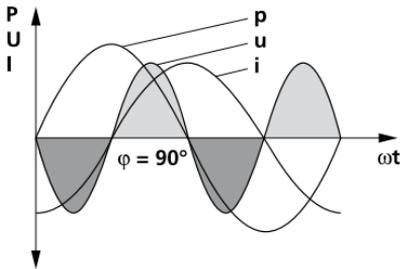
$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

[M] [M] [A]

### ■ 1.3: Blindleistung

Induktive Blindleistung tritt bei Motoren und Transformatoren im Leerlaufbetrieb auf, wenn man von Leitungs-, Eisen- und ggf. Reibungsverlusten absieht. Von beinahe rein kapazitiver Blindleistung kann man bei FRAKO Leistungs-Kondensatoren sprechen, wenn diese extrem niedrige Verluste (< 0,05 %) aufweisen.

Wenn Spannungs- und Stromkurve um 90° gegeneinander verschoben sind, verläuft die Leistungskurve zur einen Hälfte im positiven, zur anderen im negativen Bereich (Bild 3). Die Wirkleistung ist 0, da positive und negative Flächen sich gegenseitig aufheben. „Blindleistung ist die zum Auf- und Abbau des magnetischen bzw. des elektrischen Feldes zwischen Generator und Verbraucher im Takt der Netzfrequenz pendelnde Leistung“.



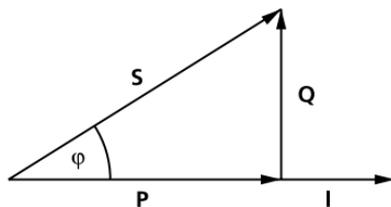
**Bild 3:** Spannung, Strom und Leistung bei reiner Blindlast ( $\varphi = 90^\circ$ )

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

[var]    [V]    [A]

### ■ 1.4: Scheinleistung

Die Scheinleistung ist entscheidend für die Belastung der elektrischen Leitungsnetze. Generatoren, Transformatoren, Schaltanlagen, Sicherungen und Leitungsquerschnitte müssen für die auftretende Scheinleistung dimensioniert sein.



**Bild 4:** Leistungsdiagramm

„Die Scheinleistung ist das ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung gewonnene Produkt aus Spannung und Strom“.

$$S = U \cdot I$$

[VA]    [V]    [A]

Die Scheinleistung ergibt sich aus der geometrischen Addition von Wirk- und Blindleistung:

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

[VA]    [W]    [var]

### ■ 1.5: Leistungsfaktor ( $\cos \varphi$ und $\tan \varphi$ )

Der Kosinus ( $\cos$ ) des Winkels der Phasenverschiebung ( $\varphi$ ) zwischen Strom und Spannung erlaubt einfaches Umrechnen von Wirk- und Scheinkomponenten für Leistungen, Spannungen und Ströme. In der Praxis hat sich die Bezeichnung „Leistungsfaktor“ eingebürgert.

Bei elektrischen Maschinen ist üblicherweise der bei Volllast gültige Leistungsfaktor auf dem Typenschild angegeben.

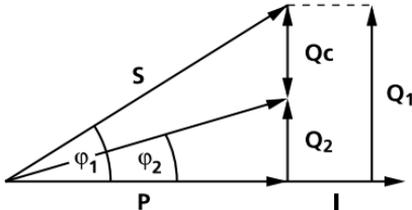
Der Tangens ( $\tan$ ) des Phasenverschiebungswinkels ( $\varphi$ ) erlaubt einfaches umrechnen von Blind- und Wirkeinheiten. Kosinus und Tangens stehen in folgender Beziehung:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \text{[W]/[VA]}$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad \text{[var]/[W]}$$

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \varphi}} \quad \text{bzw.:} \quad \tan \varphi = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1}$$

Da das elektrische Versorgungsnetz für die Scheinleistung ausgelegt sein muss, ist man bestrebt, diese so niedrig wie möglich zu halten. Schaltet man den Verbrauchern Kondensatoren in geeigneter Größe parallel, dann pendelt der Blindstrom zwischen Kondensator und Verbraucher. Das übrige Netz wird nicht mehr zusätzlich belastet. Erreicht man durch die Kompensation einen Leistungsfaktor von 1, so wird im Netz nur noch Wirkstrom übertragen.



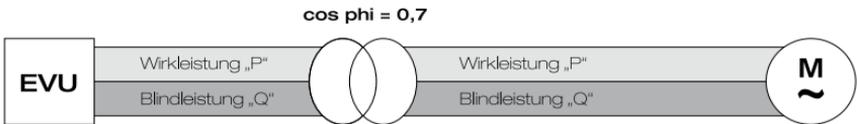
Die vom Kondensator aufgenommene Blindleistung  $Q_c$  ergibt sich aus der Differenz der induktiven Blindleistung  $Q_1$  vor der Kompensation und  $Q_2$  nach der Kompensation, also ist:  $Q_c = Q_1 - Q_2$

$$Q_c = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

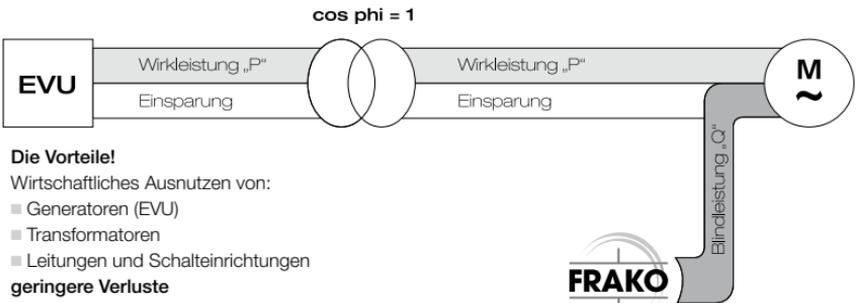
**Bild 5:** Leistungsdiagramm mit Kompensation

■ **1.6: Warum wird kompensiert?**

Der zwischen Generator (Elektrizitätswerk) und Verbraucher hin und her pendelnde Blindstrom wird im Leitungsnetz in Wärme umgesetzt. Generatoren, Transformatoren, Leitungen und Schalteinrichtungen werden zusätzlich belastet. Es treten Verluste und Spannungsfall auf. Bei hohem Blindstromanteil können die verlegten Querschnitte nicht voll zur Energieübertragung ausgenutzt werden oder müssen stärker dimensioniert sein. Aus der Sicht der EVU (Versorgungsnetzbetreiber) steigen bei schlechtem Leistungsfaktor die Investitions- und Wartungskosten für das Versorgungsnetz. Diese Mehrkosten werden dem Verursacher, nämlich dem Stromabnehmer mit schlechtem Leistungsfaktor, in Rechnung gestellt. Deshalb installiert man neben dem Zähler für Wirkarbeit auch noch einen solchen für Blindarbeit.



**Bild 6:** Wirk- und Blindleistung im Leitungsnetz: ohne Kompensation



**Die Vorteile!**

Wirtschaftliches Ausnutzen von:

- Generatoren (EVU)
- Transformatoren
- Leitungen und Schalteinrichtungen

**geringere Verluste**

**geringerer Spannungsfall**

dadurch:

**geringere Energiekosten!**



**Bild 7:** Wirk- und Blindleistung im Leitungsnetz: mit Kompensation

# Kapitel 2: Kompensationsarten

## 2.1: Einzelkompensation

Im einfachsten Fall wird jedem induktiven Verbraucher ein Kondensator geeigneter Größe parallel geschaltet. Man erreicht damit eine volle Entlastung der Leitungen, einschließlich der Zuleitung zu dem kompensierten Verbraucher. Dafür nimmt man in Kauf, dass der Kondensator nur während des Zeitraumes ausgenutzt wird, in dem die betreffende Maschine in Betrieb ist. Außerdem ist es nicht immer einfach, die Kondensatoren direkt bei den zu kompensierenden Maschinen unterzubringen (Platzprobleme, Montagekosten).

### Anwendung:

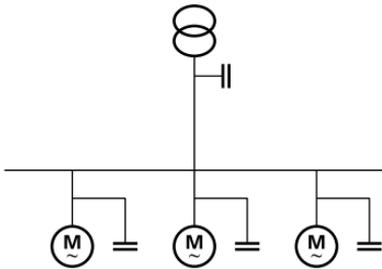


Bild 8: Beispiel für Einzelkompensation

- zur Kompensation der Leerlauf-Blindleistung von Transformatoren
- für Antriebe im Dauerbetrieb
- bei Antrieben mit knapp ausgelegten oder langen Zuleitungen

### Vorteile:

- das innerbetriebliche Netz wird voll vom Blindstrom entlastet
- niedrige Kosten pro kVAr

### Nachteile:

- die Kompensation ist über den ganzen Betrieb verstreut
- großer Installationsaufwand
- insgesamt ist eine größere Kondensatorleistung notwendig, da der Gleichzeitigkeitsfaktor unberücksichtigt bleibt

## 2.2: Gruppenkompensation

Maschinen, die stets gemeinsam eingeschaltet sind, können zu einer Gruppe zusammengefasst und gemeinsam kompensiert werden. Anstelle mehrerer kleiner Kondensatoren wird ein einzelner Kondensator geeigneter Größe installiert.

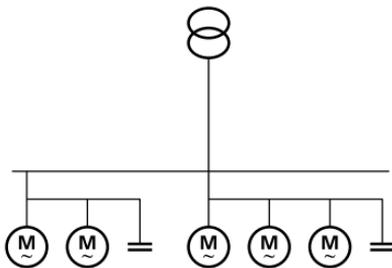


Bild 9: Beispiel für Gruppenkompensation

### Anwendung:

- für mehrere induktive Verbraucher, wenn diese stets gemeinsam betrieben werden

### Vorteile:

- ähnlich wie bei der Einzelkompensation, aber wirtschaftlicher

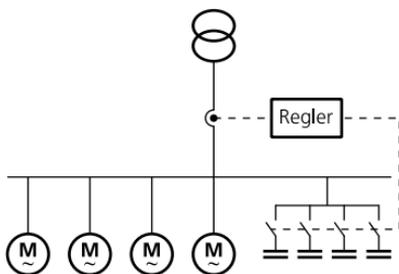
### Nachteile:

- nur für Gruppen von Verbrauchern verwendbar, die immer gemeinsam betrieben werden

### ■ 2.3: Zentralkompensation

Die gesamte Kompensation wird an zentraler Stelle, z. B. beim Niederspannungs-Hauptverteiler, angeordnet. Es wird damit der gesamte Bedarf an Blindleistung abgedeckt. Die Kondensatorleistung ist auf mehrere Schaltstufen aufgeteilt und wird durch einen automatischen Blindleistungsregler über Schaltschütze den Lastverhältnissen angepasst.

Dieser Weg wird heute in den meisten Fällen realisiert. Die zentral angeordnete Kompensation kann leicht überwacht werden. Moderne Blindleistungsregler gestatten eine laufende Kontrolle von Schaltzustand,  $\cos \varphi$  und der Wirk- und Blindströme sowie der im Netz enthaltenen Oberschwingungen. Meist kommt man mit einer niedrigeren Gesamtleistung der Kondensatoren aus, da der Gleichzeitigkeitsfaktor des ganzen Betriebes bei der Auslegung berücksichtigt werden kann. Die installierte Kondensatorleistung wird besser ausgenutzt. Allerdings wird das betriebsinterne Leitungsnetz selbst nicht vom Blindstrom entlastet, was bei ausreichenden Querschnitten kein Nachteil sein muss.



**Bild 10:** Beispiel für Zentralkompensation

#### Anwendung:

- kann immer eingesetzt werden, wenn das innerbetriebliche Leitungsnetz nicht unterdimensioniert ist

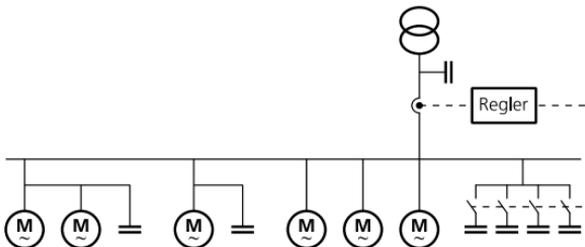
#### Vorteile:

- überschaubares Konzept
- gute Nutzung der installierten Kondensatorleistung
- meist einfachere Installation
- weniger Kondensatorleistung nötig, da der Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt wird
- bei überschwingungshaltigen Netzen kostengünstiger, da geregelte Anlagen einfacher zu verdrahten sind

#### Nachteile:

- innerbetriebliches Netz wird nicht entlastet
- zusätzliche Kosten für die automatische Regelung

### ■ 2.4: Gemischte Kompensation



**Bild 11:** Beispiel für eine gemischte Kompensation

Aus wirtschaftlichen Erwägungen ist es oft vorteilhaft, die drei zuvor beschriebenen Verfahren miteinander zu kombinieren.

# Kapitel 3: Ermittlung der Kondensatorleistung

## ■ 3.1: Stromtarife

Für kleinere Stromabnehmer gelten in der Regel feste Tarife des zuständigen EVU (Energie-Versorgungs-Unternehmen), während mit Großabnehmern Sonderverträge abgeschlossen werden.

Bei den meisten Verträgen setzen sich die Stromkosten zusammen aus:

- Leistung [kW], gemessen mit Maximumzähler, z.B. Monats- oder sogar Jahres-Maximum, i.d.R. über 15 min. gemittelt.
- Wirkarbeit [kWh], gemessen mit Wirkstromzähler, meistens Tag- und Nachtтарif getrennt.
- Blindarbeit [kVAh], gemessen mit Blindstromzähler, z. T. auch Tag- und Nachtтарif getrennt.

Bei Arbeitspreistarifen werden üblicherweise nur dann Kosten für die Blindarbeit berechnet, wenn diese 50 % der bezogenen Wirkarbeit überschreitet. Dies entspricht einem Leistungsfaktor von  $\cos \varphi = 0,9$ . Es besteht nicht die Forderung, dass der Wert 0,9 niemals unterschritten werden darf. Als Basis gilt der Leistungsfaktor im Monatsmittel. In manchen EVU-Bezirken werden auch andere Leistungsfaktoren gefordert, z. B. 0,85 oder 0,95.

Bei anderen Tarifen wird die Leistung nicht in kW sondern in kVA berechnet. Die Kosten für die Blindarbeit sind dann im Leistungspreis enthalten. Zur optimalen Kostenreduzierung muss in diesem Fall ein Leistungsfaktor von  $\cos \varphi = 1$  angestrebt werden. Generell darf man davon ausgehen, dass bei richtig dimensionierter Kompensation die Blindstromkosten vollständig eingespart werden.

## ■ 3.2: Überschlägige Schätzung

Nachfolgend werden genaue Angaben darüber gemacht, wie die erforderliche Kondensatorleistung ermittelt werden kann. Zu Planungszwecken ist es oft wünschenswert, schnell eine Größenordnung zu kennen. Es soll auch Fälle geben, wo man zwar genau gerechnet hat, aber nicht ganz sicher ist, ob sich irgendwo ein Denkfehler eingeschlichen hat. Dann kann durch Schätzung überprüft werden, inwieweit das gerechnete Ergebnis im Rahmen liegt.

Verbraucher	Kondensatorleistung
→ einzelkompensierte Motoren	→ 35 – 40 % der Motor-Nennleistung
→ einzelkompensierte Transformatoren	→ 2,5 % der Transformatorleistung → 5 % bei älteren Transformatoren
→ Zentralkompensation	→ 25 – 33 % der Transformatorleistung bei Ziel $\cos \varphi = 0,9$ → 40 – 50 % der Transformatorleistung bei Ziel $\cos \varphi = 1$

**Tabelle 1:** Schätzwerte für die erforderliche Kondensatorleistung

## ■ 3.3: Auflisten von Verbrauchern

Bei Neueinrichtung eines Betriebes oder eines Betriebsabschnittes ist zunächst eine überschlägige Schätzung angebracht. Ein genaueres Bild verschafft eine Auflistung der zu installierenden Verbraucher und deren elektrische Daten, unter Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors. Im Zweifelsfalle sollte die Kompensation immer so geplant und ausgeführt werden, dass eine spätere Erweiterung ohne großen Aufwand möglich ist. Die Zuleitungen bzw. Sicherungsabgänge für die Kompensation sollten auf Zuwachs ausgelegt sein, außerdem sollten Platzreserven für zusätzliche Kondensatoreinheiten vorgesehen werden.

### ■ 3.4: Ermittlung durch Messung von Stromstärke und Leistungsfaktor

Amperemeter und Leistungsfaktormesser sind häufig in der NS-Hauptverteilung eingebaut. Ebenso gut können auch Zangen-Messgeräte verwendet werden. Gemessen wird in der Hauptzuleitung (z. B. in der Einspeisung vom Transformator) bzw. in der Zuleitung des zu kompensierenden Betriebsteils. Gleichzeitige Messung der Netzspannung verbessert die Genauigkeit der Berechnung. Man kann aber auch einfach die Nennspannung (z. B. 380 bzw. 400V) einsetzen.

Aus den Messwerten für Spannung **U**, Scheinstrom **I<sub>S</sub>** und Leistungsfaktor lässt sich die Wirkleistung **P** berechnen:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_S \cdot \cos \varphi \cdot 10^{-3}$$

[kW]                      [V]    [A]

Ist der gewünschte Ziel-cos  $\varphi$  festgelegt, kann man anhand der nachstehenden Formel die Kondensatorleistung berechnen. Einfacher ist es jedoch, den Faktor „**f**“ aus Tabelle 2 (siehe [Seite 12](#)) zu entnehmen und mit der errechneten Wirkleistung zu multiplizieren.

$$Q_C = P \cdot (\tan \varphi_{\text{Ist}} - \tan \varphi_{\text{Soll}})$$

[VAr]                      [W]

oder:

$$Q_C = P \cdot f$$

[VAr]                      [W]

#### Beispiel:

■ Messwerte für Scheinstrom I <sub>S</sub> :	248 A
■ Leistungsfaktor cos $\varphi_{\text{Ist}}$ :	0,86
■ Ziel-cos $\varphi_{\text{Soll}}$ :	0,92
■ Spannung U:	397 V

Berechnung:

$$P = \sqrt{3} \cdot 397 \cdot 248 \cdot 0,86 \cdot 10^{-3}$$

$$P = 146,6 \text{ kW}$$

Aus Tabelle 2 entnehmen:

$$\text{Faktor „f“} = 0,17$$

Erforderliche Kondensatorleistung:

$$Q_C = 146,6 \cdot 0,17 = 24,9 \text{ kVAr}$$

#### Hinweis:

Eine Messung, wie oben beschrieben, ergibt selbstverständlich nur Augenblickswerte. Die Lastverhältnisse können je nach Tages- und Jahreszeit stark unterschiedlich sein. Die Messung sollte deshalb jemand durchführen, der den Betrieb kennt. Man sollte mehrere Messungen durchführen und darauf achten, dass die zu kompensierenden Verbraucher wirklich eingeschaltet sind. Auch sollten die Messwerte schnell – möglichst alle Instrumente gleichzeitig – abgelesen werden, damit durch eine plötzliche Lastschwankung keine Verfälschung des Ergebnisses verursacht wird.

### ■ 3.5: Ermittlung durch Messung mit Wirk- und Blindleistungsschreiber

Zuverlässigere Ergebnisse erhält man mit schreibenden Messgeräten. Die Werte können über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet werden, man erfasst hierbei auch Spitzenwerte. Die Kondensatorleistung wird wie folgt berechnet:

$Q_C$ : erforderliche Kondensatorleistung

$Q_L$ : gemessene Blindleistung

$P$ : gemessene Wirkleistung

$\tan \varphi_2$ : der dem gewünschten  $\cos \varphi$

entsprechende  $\tan \varphi$  (kann aus Tabelle 2 entnommen werden, z. B. für  $\cos \varphi = 0,92$  ist der entsprechende  $\tan \varphi = 0,43$ )

$$Q_C = \frac{Q_L}{[\text{VA}]} - \frac{(P \cdot \tan \varphi_2)}{[\text{W}]}$$

### ■ 3.6: Ermittlung durch Ablesen der Zähler

Wirk- und Blindstromzähler werden zu Arbeitsbeginn abgelesen. 8 Stunden später werden beide Zähler wieder abgelesen. Falls eine Pause dazwischen liegt, müssen die 8 Stunden um die Pausenzeit verlängert werden.

$BZ_1$ : Blind-Zählerstand, Anfangsablesung

$BZ_2$ : Blind-Zählerstand, Endablesung

$WZ_1$ : Wirk-Zählerstand, Anfangsablesung

$WZ_2$ : Wirk-Zählerstand, Endablesung

$$\frac{BZ_2 - BZ_1}{WZ_2 - WZ_1} = P \cdot \tan \varphi$$

Mit dem so errechneten Wert  $\tan \varphi$  und dem Ziel- $\cos \varphi$  wird aus Tabelle 2 Faktor „ $f$ “ abgelesen, „ $k$ “ ist das Übersetzungsverhältnis der Zähler-Stromwandler. Daraus ergibt sich die erforderliche Kondensatorleistung:

$$Q_C = \frac{(WZ_2 - WZ_1) \cdot k}{8} \cdot f$$

#### Beispiel:

Es wurden folgende Zählerstände notiert:

- Wirkstromzähler: ( $WZ_1$ ) ... 115,3  
( $WZ_2$ ) ... 124,6
- Blindstromzähler: ( $BZ_1$ ) ... 311,2  
( $BZ_2$ ) ... 321,2
- Zeitunterschied  
nach der Ablesung: 8 Stunden
- Stromwandler-  
Übersetzung ( $k$ ): 150/5 A (=30)

Berechnung:

$$\tan \varphi = \frac{321,2 - 311,2}{124,6 - 115,3} = 1,08$$

Für einen Ziel- $\cos \varphi$  von 0,92 wird „ $f$ “  
abgelesen mit 0,65.

Die Kondensatorleistung ist:

$$Q_C = \frac{(124,6 - 115,3) \cdot 30}{8} \cdot 0,65 = 22,7 \text{ kVA}r$$

**Tabelle 2:** Faktor „f“ ( $f = \tan \varphi_{\text{net}} - \tan \varphi_{\text{scbl}}$ )

gegenwärtiger tan $\varphi \leftrightarrow$ cos $\varphi$	geforderter Ziel-cos $\varphi$				← induktiv (l)			kapazitiv (k) →			
	0,80i	0,85i	0,90i	0,92i	0,95i	0,98i	1,00	0,98k	0,95k	0,92k	0,90k
3,18 ↔ <b>0,30</b>	2,43	2,56	2,70	2,75	2,85	2,98	3,18	3,38	3,51	3,61	3,66
2,96 ↔ <b>0,32</b>	2,21	2,34	2,48	2,53	2,63	2,76	2,96	3,16	3,29	3,39	3,45
2,77 ↔ <b>0,34</b>	2,02	2,15	2,28	2,34	2,44	2,56	2,77	2,97	3,09	3,19	3,25
2,59 ↔ <b>0,36</b>	1,84	1,97	2,11	2,17	2,26	2,39	2,59	2,79	2,92	3,02	3,08
2,43 ↔ <b>0,38</b>	1,68	1,81	1,95	2,01	2,11	2,23	2,43	2,64	2,76	2,86	2,92
2,29 ↔ <b>0,40</b>	1,54	1,67	1,81	1,87	1,96	2,09	2,29	2,49	2,62	2,72	2,78
2,16 ↔ <b>0,42</b>	1,41	1,54	1,68	1,73	1,83	1,96	2,16	2,36	2,49	2,59	2,65
2,04 ↔ <b>0,44</b>	1,29	1,42	1,56	1,61	1,71	1,84	2,04	2,24	2,37	2,47	2,53
1,93 ↔ <b>0,46</b>	1,18	1,31	1,45	1,50	1,60	1,73	1,93	2,13	2,26	2,36	2,41
1,83 ↔ <b>0,48</b>	1,08	1,21	1,34	1,40	1,50	1,62	1,83	2,03	2,16	2,25	2,31
1,73 ↔ <b>0,50</b>	0,98	1,11	1,25	1,31	1,40	1,53	1,73	1,94	2,06	2,16	2,22
1,64 ↔ <b>0,52</b>	0,89	1,02	1,16	1,22	1,31	1,44	1,64	1,85	1,97	2,07	2,13
1,56 ↔ <b>0,54</b>	0,81	0,94	1,07	1,13	1,23	1,36	1,56	1,76	1,89	1,98	2,04
1,48 ↔ <b>0,56</b>	0,73	0,86	1,00	1,05	1,15	1,28	1,48	1,68	1,81	1,91	1,96
1,40 ↔ <b>0,58</b>	0,65	0,78	0,92	0,98	1,08	1,20	1,40	1,61	1,73	1,83	1,89
1,33 ↔ <b>0,60</b>	0,58	0,71	0,85	0,91	1,00	1,13	1,33	1,54	1,66	1,76	1,82
1,27 ↔ <b>0,62</b>	0,52	0,65	0,78	0,84	0,94	1,06	<b>1,27</b>	1,47	1,59	1,69	1,75
1,20 ↔ <b>0,64</b>	0,45	0,58	0,72	0,77	0,87	1,00	1,20	1,40	1,53	1,63	1,68
1,14 ↔ <b>0,66</b>	0,39	0,52	0,65	0,71	0,81	0,94	1,14	1,34	1,47	1,56	1,62
1,08 ↔ <b>0,68</b>	0,33	0,46	0,59	<b>0,65</b>	0,75	0,88	1,08	1,28	1,41	1,50	1,56
1,02 ↔ <b>0,70</b>	0,27	0,40	0,54	0,59	0,69	0,82	1,02	1,22	1,35	1,45	1,50
0,99 ↔ <b>0,71</b>	0,24	0,37	0,51	0,57	0,66	0,79	0,99	1,19	1,32	1,42	1,48
0,96 ↔ <b>0,72</b>	0,21	0,34	0,48	0,54	0,64	0,76	0,96	1,17	1,29	1,39	1,45
0,94 ↔ <b>0,73</b>	0,19	0,32	0,45	0,51	0,61	0,73	0,94	1,14	1,26	1,36	1,42
0,91 ↔ <b>0,74</b>	0,16	0,29	0,42	0,48	0,58	0,71	0,91	1,11	1,24	1,33	1,39
0,88 ↔ <b>0,75</b>	0,13	0,26	0,40	0,46	0,55	0,68	0,88	1,08	1,21	1,31	1,37
0,86 ↔ <b>0,76</b>	0,11	0,24	0,37	0,43	0,53	0,65	0,86	1,06	1,18	1,28	1,34
0,83 ↔ <b>0,77</b>	0,08	0,21	0,34	0,40	0,50	0,63	0,83	1,03	1,16	1,25	1,31
0,80 ↔ <b>0,78</b>	0,05	0,18	0,32	0,38	0,47	0,60	0,80	1,01	1,13	1,23	1,29
0,78 ↔ <b>0,79</b>	0,03	0,16	0,29	0,35	0,45	0,57	0,78	0,98	1,10	1,20	1,26
0,75 ↔ <b>0,80</b>	-	0,13	0,27	0,32	0,42	0,55	0,75	0,95	1,08	1,18	1,23
0,72 ↔ <b>0,81</b>	-	0,10	0,24	0,30	0,40	0,52	0,72	0,93	1,05	1,15	1,21
0,70 ↔ <b>0,82</b>	-	0,08	0,21	0,27	0,37	0,49	0,70	0,90	1,03	1,12	1,18
0,67 ↔ <b>0,83</b>	-	0,05	0,19	0,25	0,34	0,47	0,67	0,88	1,00	1,10	1,16
0,65 ↔ <b>0,84</b>	-	0,03	0,16	0,22	0,32	0,44	0,65	0,85	0,97	1,07	1,13
0,62 ↔ <b>0,85</b>	-	-	0,14	0,19	0,29	0,42	0,62	0,82	0,95	1,05	1,10
0,59 ↔ <b>0,86</b>	-	-	0,11	<b>0,17</b>	0,26	0,39	0,59	0,80	0,92	1,02	1,08
0,57 ↔ <b>0,87</b>	-	-	0,08	0,14	0,24	0,36	0,57	0,77	0,90	0,99	1,05
0,54 ↔ <b>0,88</b>	-	-	0,06	0,11	0,21	0,34	0,54	0,74	0,87	0,97	1,02
0,51 ↔ <b>0,89</b>	-	-	0,03	0,09	0,18	0,31	0,51	0,72	0,84	0,94	1,00
0,48 ↔ <b>0,90</b>	-	-	-	0,06	0,16	0,28	0,48	0,69	0,81	0,91	0,97
0,46 ↔ <b>0,91</b>	-	-	-	0,03	0,13	0,25	0,46	0,66	0,78	0,88	0,94
0,43 ↔ <b>0,92</b>	-	-	-	-	0,10	0,22	0,43	0,63	0,75	0,85	0,91
0,40 ↔ <b>0,93</b>	-	-	-	-	0,07	0,19	0,40	0,60	0,72	0,82	0,88
0,36 ↔ <b>0,94</b>	-	-	-	-	0,03	0,16	0,36	0,57	0,69	0,79	0,85
0,33 ↔ <b>0,95</b>	-	-	-	-	-	0,13	0,33	0,53	0,66	0,75	0,81
0,29 ↔ <b>0,96</b>	-	-	-	-	-	0,09	0,29	0,49	0,62	0,72	0,78
0,25 ↔ <b>0,97</b>	-	-	-	-	-	0,05	0,25	0,45	0,58	0,68	0,73
0,20 ↔ <b>0,98</b>	-	-	-	-	-	-	0,20	0,41	0,53	0,63	0,69
0,14 ↔ <b>0,99</b>	-	-	-	-	-	-	0,14	0,35	0,47	0,57	0,63
0,00 ↔ <b>1,00</b>	-	-	-	-	-	-	-	0,20	0,33	0,43	0,48

### ■ 3.7: Ermittlung aus der Stromrechnung

Relativ leicht und mit guter Genauigkeit lässt sich die Kondensatorleistung aus der monatlichen Stromrechnung des EVU ermitteln. Ist der Stromverbrauch das ganze Jahr über konstant, kann die Jahresabrechnung oder eine beliebige Monatsrechnung (aber nicht gerade die, in welche die Betriebsferien fallen) zugrunde gelegt werden. Treten saisonbedingte Schwankungen auf, dann muss selbstverständlich eine Rechnung aus der Hauptbetriebszeit gewählt werden. Werden Tag- und Nachtarif (HT und NT) getrennt gemessen, setzt man zur Berechnung meist die HT-Werte ein. Man kann davon ausgehen, dass die Kondensatorleistung zur Deckung des nachts anfallenden Blindstroms ausreicht. In Sonderfällen, wo überwiegend mit preisgünstigerem Nachtstrom gearbeitet wird, dürfen jedoch die NT-Werte nicht vernachlässigt werden.

#### ■ 3.7.1: Arbeitspreis-Tarif

Beim Arbeitspreis-Tarif werden **Vorhalteleistung**, **Wirkarbeit** und **Blindarbeit** getrennt in Rechnung gestellt. In den meisten Verträgen bleibt für die Blindarbeit der Anteil von 50% der Wirkarbeit ohne Berechnung. Nur was darüber liegt muss bezahlt werden. Dies entspricht in etwa einem  $\cos \varphi$  von 0,9. Es empfiehlt sich aber, für die Berechnung einen etwas höheren Wert z. B. 0,92 einzusetzen, um bei der Kondensatorleistung etwas Leistungsreserve zu erhalten.

**Berechnungsbeispiel**, Werte aus der Stromrechnung:

- Wirkleistung: 99 kW
- Wirkarbeit (HT): 17.820 kWh
- Blindarbeit (HT): 19.245 kVAh

$$\tan \varphi = \frac{\text{Blindarbeit (HT)}}{\text{Wirkarbeit (HT)}} = \frac{19.245 \text{ kVAh}}{17.820 \text{ kWh}} = 1,08$$

Der Istwert für den  $\cos \varphi$  kann nun aus der Tabelle 2 entnommen werden. Für den errechneten  $\tan \varphi$  von 1,08 ergibt sich ein  $\cos \varphi_1$  von 0,68. Für einen Ziel- $\cos \varphi_2 = 0,92$  wird der Tabelle 2 ein Faktor „f“ von **0,65** abgelesen. Die erforderliche Kondensatorleistung errechnet sich aus:

Wirkleistung x Faktor „f“

$$99 \text{ kW} \cdot 0,65 = 64,35 \text{ kVA}$$

In diesem Fall ist eine Kondensatorleistung von 75 kVA zu wählen. Um eine evtl. Erweiterung des Betriebs mit abzudecken, kann eine etwas höhere Leistung (z. B. 100 kVA) gewählt werden.

#### ■ 3.7.2: Leistungspreis-Tarif

In diesem Fall legt das EVU den während eines Monats angefallenen Höchstwert der Leistung für die Abrechnung zugrunde. Dabei wird nicht die Wirk-, sondern die **Scheinleistung** berechnet! Um die kleinstmögliche Scheinleistung zu erreichen, empfiehlt es sich, die Kondensatorleistung für einen Ziel- $\cos \varphi$  von 1 auszuliegen.

**Berechnungsbeispiel**, Werte aus der Stromrechnung:

- Wirkleistungsmaximum: 104 kW
- Leistungsfaktor  $\cos \varphi_1$ : 0,62

$$\frac{\text{Wirkleistungs-Maximum}}{\cos \varphi} = \frac{104 \text{ kW}}{0,62} = 168 \text{ kVA}$$

Für den Istwert  $\cos \varphi_1 = 0,62$  und den Zielwert  $\cos \varphi_2 = 1$  ergibt sich aus Tabelle 2 ein Faktor „f“ von **1,27**. Die erforderliche Kondensatorleistung errechnet sich aus:

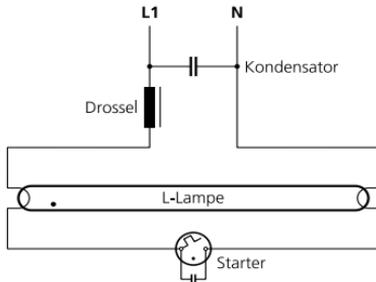
Wirkleistung x Faktor „f“

$$104 \text{ kW} \cdot 1,27 = 132,08 \text{ kVA}$$

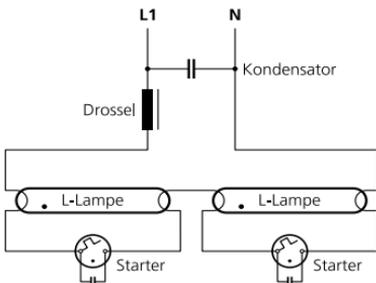
Hier eignet sich eine Blindleistungs-Regelanlage mit einer Kondensatorleistung von 150 bis 175 kVA in fein abgestufter Ausführung.

# Kapitel 4: Anwendungen

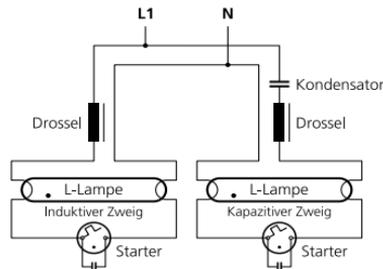
## ■ 4.1: Kompensation von Entladungslampen



**Bild 12:** Einzelhaltung, der Kondensator wird parallel zur Lampe geschaltet (Parallelkondensator mit Nennspannung 230V).



**Bild 13:** Reihenschaltung (Tandemschaltung), der Kondensator mit Nennspannung 230V wird parallel zu den Lampen geschaltet.



**Bild 14:** Duoschaltung, der Kondensator wird in Reihe zu den Lampen geschaltet (Reihen Kond. mit Nennspannung 450V).

Entladungslampen müssen mit strombegrenzenden Vorschaltgeräten betrieben werden. Streufeldtransformatoren werden überwiegend bei Natriumdampf-Niederdrucklampen eingesetzt, alle anderen Entladungslampen erhalten Drosselspulen als Vorschaltgerät. Durch die Induktivität ergibt sich ein Leistungsfaktor von  $\cos \varphi$  etwa 0,5 bei Drosseln und ca. 0,3 bei Streufeldtransformatoren.

Zur Kompensation von induktiven Vorschaltgeräten können einphasige Kondensatoren parallel oder in Reihe geschaltet werden.

Bei der Einzelschaltung mit einer Lampe und der Reihenschaltung aus zwei Lampen (Tandemschaltung) wird der Kondensator parallel zur Lampe geschaltet, die Kondensator-Nennspannung (230 V) ist gleich der Netzspannung.

**Wichtig:** Netzparallele Kondensatoren bilden mit den reaktiven Netzimpedanzen einen Schwingkreis. Dadurch können vorhandene Oberschwingungen verstärkt und Tonfrequenz-Rundsteueranlagen gestört werden (siehe separates Thema, [Seite 42](#)).

Bei der besonders wirtschaftlichen Duoschaltung wird nur ein Kondensator für zwei Lampen benötigt. Der eine Zweig wird induktiv belassen, wobei das zweite Vorschaltgerät kapazitiv kompensiert wird. Der Kondensator muss wegen der auftretenden Spannungserhöhung durch die Reihenschaltung aus Induktivität und Kapazität für eine höhere Nennspannung (450 V) ausgelegt sein. Resonanzbedingte Störungen, wie mit parallel geschalteten Kondensatoren, treten nicht auf. Darüberhinaus wird die Gesamtwelligkeit der einzelnen Lampen verbessert und die bei rotierenden Maschinen möglichen stroboskopischen Effekte vermieden. Deshalb ist die Reihenschaltung aus Kondensator und Vorschaltgerät bei vielen Energieversorgungsunternehmen gefordert und grundsätzlich zu empfehlen.

**Elektronische Vorschaltgeräte** für Leuchtstofflampen oder **Netzgeräte** für LED-Lampen benötigen **keine Kompensation**. Durch deren nichtlineare Stromaufnahme muss jedoch, besonders bei einer großen Anzahl von Lampen, mit erhöhten Oberschwingungspegeln gerechnet werden (siehe Thema Power-Quality, ab [Seite 32](#)).

#### ■ 4.1.1: Auswahltabelle für Entladungslampen

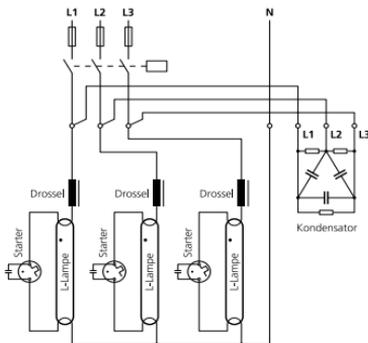
Die Tabelle gibt zu den verschiedenen Lampentypen den jeweils passenden Kondensator an. **Wichtig:** Bei verlustarmen Vorschaltgeräten werden Reihen-kondensatoren mit kleinerer Kapazität eingesetzt, als in der Tabelle angegeben. Die Werte können je nach Lampenhersteller voneinander abweichen. Maßgebend ist immer der auf der Drossel angegebene Kapazitätswert. Die gängigsten Reihen-kondensatoren für verlustarme Vorschaltgeräte:

- 18 W      2,7 µF / 480 V
- 36 W      3,4 µF / 450 V    3,5 µF / 450 V
- 58 W      5,3 µF / 450 V    5,4 µF / 450 V

Lampen-Leistung in W	Parallel-Kond. Kapazität in µF	Reihen-Kond. Kapazität in µF
<b>Leuchtstofflampen</b>		
4 bis 16	2,0 / 230 V	-
18 bis 20	4,5 / 230 V	2,9 / 450 V
36 bis 40	4,5 / 230 V	3,6 / 450 V
58 bis 65	7,0 / 230 V	5,7 / 450 V
<b>Halogen Metall dampflampen</b>		
35	6,0 / 230 V	-
70	12,0 / 230 V	-
150	20,0 / 230 V	-
250	32,0 / 230 V	-
400	35,0 / 230 V	-
1000	85,0 / 230 V	-
2000	60,0 / 380 V	-
3500	100,0 / 380 V	-

Lampen-Leistung in W	Parallel-Kondensator Kapazität in µF
<b>Quecksilberdampf-Hochdrucklampen</b>	
50	7,0 / 230 V
80	8,0 / 230 V
125	10,0 / 230 V
250	18,0 / 230 V
400	25,0 / 230 V
700	40,0 / 230 V
1000	60,0 / 380 V
<b>Natriumdampf-Niederdrucklampen</b>	
18	5,0 / 230 V
35	20,0 / 230 V
55	20,0 / 230 V
90	25,0 / 230 V
135	45,0 / 230 V
150	20,0 / 230 V
180	40,0 / 230 V
<b>Natriumdampf-Hochdrucklampen</b>	
50	8,0 / 230 V
70	12,0 / 230 V
100	12,0 / 230 V
150	20,0 / 230 V
250	32,0 / 230 V
400	50,0 / 230 V
1000	100,0 / 230 V

#### ■ 4.1.2: Gruppenkompensation von Entladungslampen



**Bild 15:** Gruppenkompensation von dreiphasig aufgeteilten Entladungslampen (z. B. mit Leistungs-Kondensator LKT).

Schaltet man mehrere Entladungslampen gleichzeitig, kann bei einer symmetrischen Aufteilung auch ein gemeinsamer, dreiphasiger Gruppenkondensator mit einer Nennspannung von 440 V verwendet werden.

#### Kondensatorleistung:

$$Q_C = n \cdot C \cdot 0,015$$

- $Q_C$ : Kondensatorleistung in kVar
- $n$ : Lampenanzahl, dreiphasig aufgeteilt
- $C$ : Parallelkapazität pro Lampe in µF

**Beispiel:** 24 Leuchtstofflampen mit je 58 W

$$24 \cdot 7 \mu F \cdot 0,015 = 2,52 \text{ kVar}$$

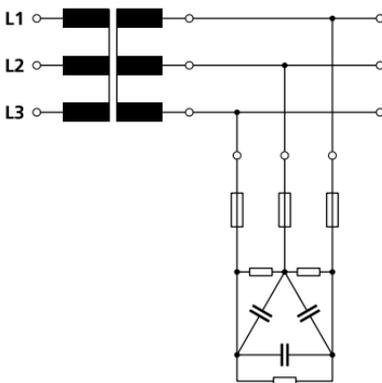
#### ■ 4.2: Einzelkompensation von Transformatoren

Die Richtlinien der EVU über die zulässige Größe fest mit dem Transformator verbundener Kondensatoren sind regional unterschiedlich. Deshalb ist vor Installation einer solchen Kompensation Rücksprache mit dem zuständigen EVU zu empfehlen. Transformatoren moderner Bauart besitzen Kernbleche, die nur geringe Leistung für die Ummagnetisierung benötigen. Ist die Kondensatorleistung zu hoch, kann es bei Leerlaufbetrieb zu Spannungserhöhungen kommen.

Gut geeignet sind Kondensatoren mit eingebauten Sicherungslasttrennern. Wenn Kondensatoren mit Sicherungslasttrenner direkt an die Klemmen des Transformators angeschlossen werden, muss man sich darüber im klaren sein, dass die Zuleitung zum Kondensator für die volle Kurzschlussleistung ausgelegt ist.

Transformator-Nennleistung [in kVA ]	Kondensatorleistung [in kVAr ]
100 – 160	2,5
200 – 250	5,0
315 – 400	7,5
500 – 630	12,5
800	15,0
1000	20,0
1250	25,0
1600	35,0
2000	40,0

**Table 3:** Richtwerte für die Einzelkompensation von Transformatoren nach VDEW



**Bild 16:** Beispiel für eine Trafo-Festkompensation

Der Kondensator mit Sicherungslasttrenner kann direkt an die Klemmen des Transformators angeschlossen werden. Die Zuleitung zum Kondensator muss für die volle Kurzschlussleistung ausgelegt sein.

**Wichtig:** Die Sicherungslasttrenner werden mit rein kapazitiver Last betrieben. Um gefährliche Lichtbögen zu vermeiden, dürfen sie deshalb nie unter Last gezogen werden!

Soll eine Trennung des Kondensators auch bei eingeschaltetem Transformator möglich sein, muss ein Leistungs-Kondensator mit Leistungs-Selbstschalter eingesetzt werden.

### ■ 4.3: Einzelkompensation von Motoren

Die Kondensatorleistung soll etwa 90% der Scheinleistung des Motors bei Leerlauf entsprechen.

Erforderliche Kondensatorleistung:

$$Q_C = 0,9 \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot I_0$$

$I_0$  = Leerlaufstrom des Motors

Damit erreicht man bei Vollast einen Leistungsfaktor von etwa 0,9 und bei Leerlauf von 0,95 - 0,98. Nach Empfehlung der VDEW gelten für Asynchronmotoren mit 1500 min<sup>-1</sup> die Richtwerte nach Tabelle 4. Für Motoren mit 1000 min<sup>-1</sup> sollte der Tabellenwert um 5%, für solche mit 750 min<sup>-1</sup> um 15% erhöht werden.

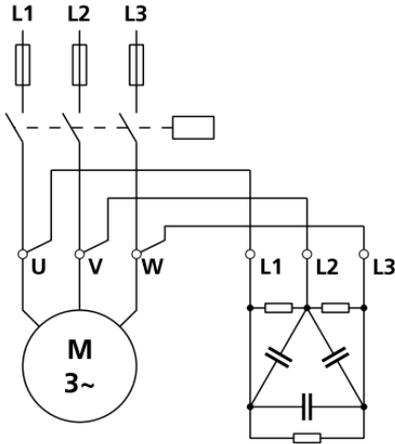
Motor-Nennleistung [in kW]	Kondensatorleistung [in kVAR]
1 bis 1,9	0,5
2 bis 2,9	1,0
3 bis 3,9	1,5
4 bis 4,9	2,0
5 bis 5,9	2,5
6 bis 7,9	3,0
8 bis 10,9	4,0
11 bis 13,9	5,0
14 bis 17,9	6,0
18 bis 21,9	7,5
22 bis 29,9	10,0
30 bis 39,9	ca. 40% der Motorleistung
ab 40	ca. 35% der Motorleistung

**Tabelle 4:** Richtwerte für die Einzelkompensation von Motoren nach VDEW

**Wichtig:** Bei einzeln kompensierten Maschinen, bei denen der Kondensator direkt mit den Motorklemmen verbunden ist, darf die Kondensatorleistung keinesfalls zu hoch ausgelegt werden. Dies gilt vor allem dann, wenn die Maschine große Schwungmassen besitzt und nach dem Ausschalten nachläuft. Der parallel liegende Kondensator kann die Maschine als Generator erregen und es treten gefährliche Überspannungen auf. Es können Schäden sowohl am Kondensator, als auch am Motor auftreten.

Im einfachsten Fall wird der Kondensator direkt mit den Klemmen des Motors verbunden. Auf eine besondere Absicherung des Kondensators kann verzichtet werden, denn die Sicherung des Motors schützt den Kondensator mit. Ist ein Motorschutzschalter eingebaut, dann empfiehlt es sich, den Auslösestrom auf einen niedrigeren Wert zu korrigieren.

**Hinweis:** Umrichterregelte Antriebe benötigen - je nach Technik - weniger oder keine Blindleistung. Da dem Netz bei dieser Art von Leistungselektronik kein sinusförmiger Strom entnommen wird, entstehen erhebliche Oberschwingungsströme, die ins Netz zurückgespeist werden (siehe Kapitel Power-Quality, ab Seite 32).



Asynchron-Motor 25 kW  
mit Drehzahl 1500 min<sup>-1</sup>

Leistungskondensator  
10 kVA/z. B.: LKN 10-400-D32

**Bild 17:** Beispiel für eine Motor-Festkompensation

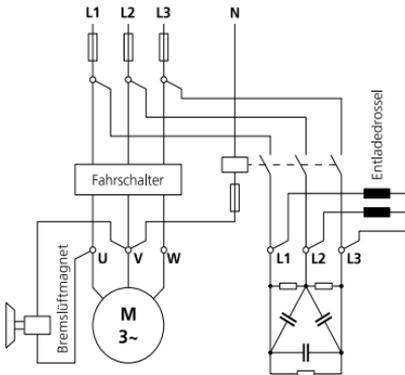
Reduzierter Auslösestrom:

$$I_{Th} = \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \cdot I_N$$

- $I_{Th}$ : neu einzustellender Auslösestrom [in A]
- $I_N$ : Motor-Nennstrom. Typenschild [in A]
- $\cos \varphi_1$ :  $\cos \varphi$  lt. Typenschild
- $\cos \varphi_2$ :  $\cos \varphi$  mit Kompensation (ca. 0,95)

Durch den niedrigen ohmschen Widerstand der Motorwicklung, wird der Kondensator direkt entladen, Entladewiderstände sind nicht dringend erforderlich.

#### 4.3.1: Einzelkompensation von Aufzug- und Hebezeugmaschinen



**Bild 18:** Aufzugmotor mit eigenem  
Kondensatorschütz und Einrichtung  
für Schnellentladung

Aufzug- und Hebezeugmaschinen arbeiten mit Sicherheitseinrichtungen, z. B. mit einem Bremslüftmagnet, der bei Stromausfall eine schnell wirkende Bremse auslöst.

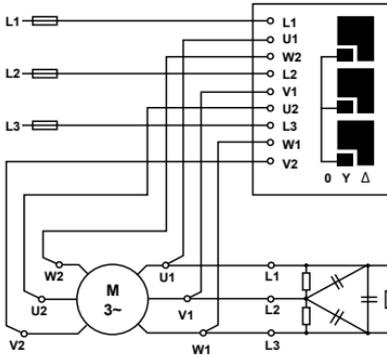
Ein direkt zum Motor parallel liegender Kondensator könnte durch seine Restenergie die einwandfreie Abbremsung verzögern oder ganz verhindern. Die Kondensatoren dürfen deshalb nur **vor** den Schaltgeräten angeschlossen werden!

Für den Kondensator sollte ein eigenes Schütz mit einer Schnellentladeeinrichtung verwendet werden. Die Schnellentladung kann entweder durch eine direkt am Kondensator angeschlossene Entladedrossel oder mit dem Kondensatorschütz geschaltete Schnellentladewiderstände erfolgen.

Durch eine steuerungsseitige Verriegelung muss ein Wiedereinschalten des Kondensators vor dem

Ablauf der Entladezeit verhindert werden. Aufgrund der Schaltheufigkeit und dem damit verbundenen Schützverschleiß empfiehlt sich der Einsatz von Kondensatorstufen mit elektronischen Schaltern. Die Kondensatoren werden im Nulldurchgang zu- und abgeschaltet, damit können Reaktionszeiten im Millisekundenbereich realisiert werden.

### ■ 4.3.2: Stern-Dreieckschalter



**Bild 19:** Handbetätigter Stern-Dreieckschalter in Sonderausführung für einzelkompensierte Motoren

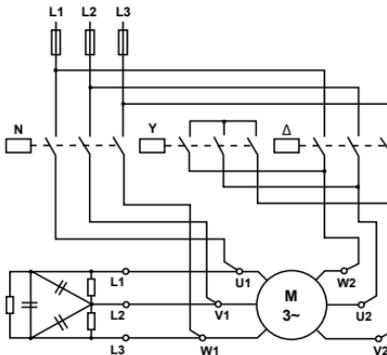
Handbetätigte Stern-Dreieckschalter müssen bei Verwendung dreiphasiger Leistungs-Kondensatoren in einer Ausführung gewählt werden, die zum Schalten von Motoren mit Einzelkompensation ausgelegt sind.

Die Kontaktbrücken müssen so ausgeführt sein, dass während der Umschaltung von Stern auf Dreieck **keine** Kurzunterbrechung auftritt, die den Kondensator auf „Phasenopposition“ schaltet.

Dabei entstehen zu hohe Umladeströme, die sowohl den Kondensator, als auch den Schalter zerstören können.

Liegt der Schalter in Nullstellung (ausgeschaltet), darf die Sternbrücke nicht geschlossen sein, damit der Kondensator nicht kurzgeschlossen wird.

### ■ 4.3.3: Stern-Dreieck-Schützkombinationen



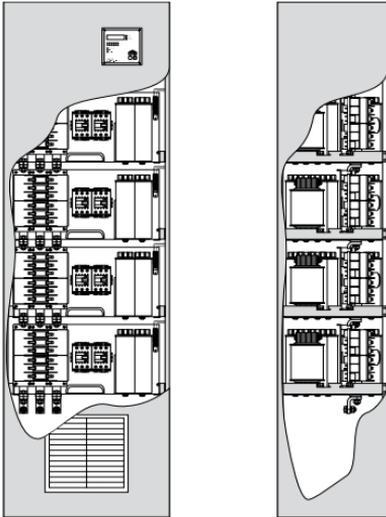
**Bild 20:** Einzelkompensierter Motor mit Stern-Dreieckschütz

Bei Stern-Dreieck-Schützkombinationen ist, ebenso wie beim Stern-Dreieckschalter, zu beachten, dass keine Kurzunterbrechung während der Umschaltung auftritt, d. h. das Netzschütz muss angezogen bleiben. Bei ausgeschaltetem Motor muss die Sternbrücke offen sein. Der Kondensator kann an die Ausgangsseite des Netzschützes oder an die Klemmen U1 - V1 - W1 des Motors angeschlossen sein, aber nicht an die Klemmen W2 - U2 - V2, wo er durch die Sternbrücke kurzgeschlossen würde.

**Wichtig:** Die Kondensatorleistung darf keinesfalls zu hoch ausgelegt werden. Dies gilt vor allem dann, wenn die Maschine große Schwungmassen besitzt und nach dem Ausschalten nachläuft. Der parallel liegende Kondensator kann die Maschine als Generator erregen und es treten gefährliche Überspannungen auf. Es können Schäden sowohl am Kondensator, als auch am Motor auftreten. Deshalb ist bei Stern-Dreieck-Anlauf zu vermeiden, dass die Sternbrücke im ausgeschalteten Zustand geschlossen bleibt. Wenn die Maschine in Sternschaltung als Generator erregt wird, sind noch höhere Spannungen zu erwarten als bei Dreieckschaltung.

#### ■ 4.4: Blindleistungs-Regelanlagen

Blindleistungs-Regelanlagen bestehen aus folgenden Komponenten:



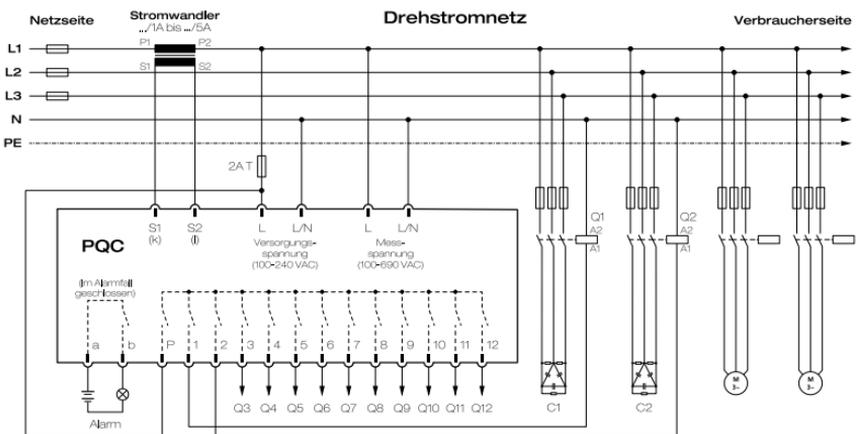
- Blindleistungsregler
- über Schütz oder elektronische Schalter betätigte Kondensatorstufen
- ggf. Filterkreisdrosseln
- Gruppensicherungen
- bei verdrosselten Anlagen mit thermostatregelmtem Belüftungssystem

Die Komponenten werden wahlweise auf Montageplatte oder, bei geforderter Erweiterbarkeit in Modultechnik, in einem Schaltschrank ausgebaut.

Eine Blindleistungs-Regelanlage wird in Netzen mit ständig schwankendem Blindleistungsbedarf eingesetzt. Die Kondensatorleistung ist auf mehrere Schaltstufen aufgeteilt und wird durch einen automatischen Blindleistungsregler über Schaltschütze oder elektronische Schalter den Lastverhältnissen angepasst.

Die zentral angeordnete Kompensation kann leicht überwacht werden. Moderne Blindleistungsregler gestatten eine laufende Kontrolle von Schaltzustand,  $\cos \varphi$  und der Wirk- und Blindströme sowie der im Netz enthaltenen Oberschwingungen. Meist kommt man mit einer

niedrigeren Gesamtleistung der Kondensatoren aus, da der Gleichzeitigkeitsfaktor des ganzen Betriebes bei der Auslegung berücksichtigt werden kann. Die installierte Kondensatorleistung wird optimal ausgenutzt.



**Bild 22:** Schaltbeispiel für eine Blindleistungs-Regelanlage

# Kapitel 5: Leistungsmerkmale

## ■ 5.1: Leistungs-Kondensatoren

FRAKO Leistungs-Kondensatoren sind ‚Made in Germany‘ und die optimale Basis für bedarfsspezifische Festkondensatoren und Blindleistungs-Regelanlagen. Unsere Leistungs-Kondensatoren besitzen ein vielfaches Sicherheitssystem für höchste Betriebssicherheit und sind weltweit erste Wahl, wenn es um die Reduktion des Blindleistungsbedarfs, die Erhöhung der Netzqualität und das Vermeiden von Blindarbeitskosten geht.

Klare Vorteile unserer Leistungs-Kondensatoren:

- Hohe Überlastbarkeit
- Lange Lebensdauer
- Höchste Betriebssicherheit

Die patentierte Kontaktringtechnologie ermöglicht es FRAKO zudem, einen bleifreien Kondensator herzustellen und die Betriebssicherheit nochmals zu verbessern. Es gibt sie in den Ausführungen Basic, Standard, Premium und in der Hochleistungs-Ausführung Heavy Duty – so bekommen Sie in Hinblick auf Strombelastbarkeit, Umgebungstemperatur und Lebenserwartung den idealen Leistungs-Kondensator für Ihre Anforderung.

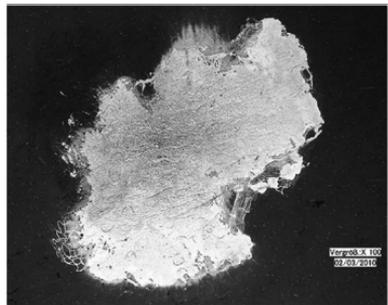
Über eine individuelle Seriennummer lässt sich jeder FRAKO Leistungs-Kondensator eindeutig identifizieren. Sie enthält Informationen zu produktionsrelevanten Daten und dient als Verknüpfung zu den Prüf- und Messergebnissen der Stückprüfung.

## 4 Sicherheitsfaktoren für den störungsfreien Betrieb

Für den störungsfreien Betrieb von Blindleistungs-Kompensationsanlagen und Passiven Filtern ist die Zuverlässigkeit der Kondensatoren von entscheidender Bedeutung. FRAKO Leistungs-Kondensatoren besitzen dafür ein Vierfach-Sicherheitssystem:

- **Sicherheitsfaktor 1:**  
"Selbstheilender Polypropylenfilm"  
Der Selbstheileneffekt bewirkt, dass sich ein Durchschlag durch das Dielektrikum von selbst wieder isoliert.

- **Sicherheitsfaktor 2:**  
"Lötfreie Verbindungen"  
Das potentielle Risiko der Wickelvorschädigung bei herkömmlicher Kondensatorfertigung ist durch den von FRAKO patentierten Kontaktring vollständig eliminiert. Darüber hinaus wird über den punktgeschweißten Anschluss der internen Verdrahtung eine dauerhaft feste Verbindung geschaffen, die für ein sicheres Abschalten bei Überdruck (siehe Sicherheitsfaktor 3) unerlässlich ist.



**Bild 23:** Selbstheilender Polypropylenfilm



**Bild 24:** Patentierter Kontaktring

■ **Sicherheitsfaktor 3:**

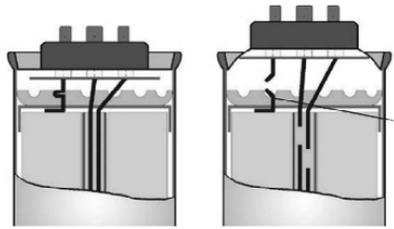
"Überdruck-Abreißsicherung"

Die Überdruck-Abreißsicherung trennt den Kondensator bei Überlast und an dessen Lebensende sicher und störungsfrei vom Netz.

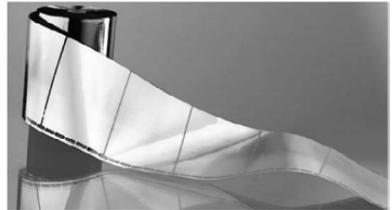
■ **Sicherheitsfaktor 4:**

"Segmentierte Metallisierung"

Der segmentierte Film ergänzt Selbstheileneffekt und Überdruck-Abreißsicherung wesentlich. Kommt es zu mehreren Durchschlägen auf größerer Fläche, besteht die Möglichkeit, dass der große Energiegehalt den Selbstheileneffekt in seiner Funktion überfordert. In diesem Fall gibt die segmentierte Metallisierung ein PLUS an Sicherheit, da ein Segment bei extremer Überlastung komplett vom Netz getrennt wird.



**Bild 25:** Überdruck-Abreißsicherung



**Bild 26:** Segmentierte Kondensatorfolie

### Besondere technische Merkmale

Bei der Entwicklung von FRAKO Leistungs-Kondensatoren orientieren wir uns stets an den Bedingungen, die in den heutigen Applikationen gefordert sind. Zu den wichtigen Faktoren zählen insbesondere:

- Spannungsbelastbarkeit
- Strombelastbarkeit
- Temperaturbelastbarkeit

### Spannungsbelastbarkeit

Alle FRAKO Leistungs-Kondensatoren werden gemäß der Normen IEC 60831-1 & -2 sowie DIN EN 60831-1 und -2 für folgende Überspannungen ausgelegt.

- 8 Stunden täglich:  $1,10 \times U_N$  Kondensator
- 30 Minuten täglich:  $1,15 \times U_N$  Kondensator
- 5 Minuten:  $1,20 \times U_N$  Kondensator
- 1 Minute:  $1,30 \times U_N$  Kondensator

Nachfolgend eine Tabelle mit einigen ausgewählten Nenn- und maximalen Überspannungen.

Nennspannung	240 V	400 V	440 V	480 V	525 V	600 V	690V	760V	800V
8 h täglich	264 V	440 V	484 V	528 V	578 V	660 V	759 V	836 V	880 V
30 min täglich	276 V	460 V	506 V	552 V	604 V	690 V	794 V	874 V	920 V
5 min täglich	288 V	480 V	528 V	576 V	630 V	720 V	828 V	912 V	960 V
1 min täglich	312 V	520 V	572 V	624 V	683 V	780 V	897 V	988 V	1040 V

## Strombelastbarkeit

Weltweit belasten Oberschwingungen die Stromnetze. Durch den vermehrten Einsatz von Umrichtertechnik steigt auch die Beanspruchung von Kondensatoren kontinuierlich an. Werden Kondensatoren in einem durch Oberschwingungen verschmutzten Stromnetz betrieben, kann es zu gefährlichen Resonanzen kommen, die wiederum die Strombelastung des Kondensators deutlich erhöhen können.

Die geltenden Normen schreiben vor, dass Leistungs-Kondensatoren für die dauerhafte Belastung mit mindestens 1,3-fachem Nennstrom ausgelegt sein müssen. Die Realität zeigt allerdings, dass bei entsprechender Oberschwingungsbelastung dieser Wert überschritten werden kann. Aus diesem Grund sind alle FRAKO Leistungs-Kondensatoren für eine dauernde Strombelastbarkeit, je nach Typenklasse von mind. 1,5- bis hin zum 2,7-fachem Nennstrom ausgelegt.

## Temperaturbelastbarkeit

Hohe Umgebungstemperaturen wirken sich negativ auf die Lebensdauer eines Kondensators aus. Bei Überschreitung der Grenztemperaturen für Betrieb und Lagerung verkürzt sich diese sogar extrem. Leistungs-Kondensatoren werden bezogen auf ihre zulässige maximale Umgebungstemperatur verschiedenen Temperaturklassen zugeordnet. Diese unterscheiden sich wie folgt:

Temperatur- klassen	Maximale Umgebungstemperatur		
	Absoluter Maximalwert	Mittelwert über 1 Tag	Mittelwert über 1 Jahr
B	45 °C	35 °C	25 °C
C	50 °C	40 °C	30 °C
D	55 °C	45 °C	35 °C

Die hier aufgeführten Temperaturen beziehen sich auf die direkte Umgebungstemperatur des Kondensators. Das bedeutet, es handelt sich hierbei um die Temperatur im Gehäuse bzw. Schaltschrank. Die Erfahrung zeigt, dass die in den Temperaturklassen aufgeführten Grenzen durchaus überschritten werden. Gerade bei Blindleistungs-Kompensationsanlagen, die mit Filterkreisdrosseln ausgeführt sind, ist mit höheren Temperaturen zu rechnen.

Aus diesem Grund sind alle FRAKO Leistungs-Kondensatoren der Typenklassen Standard, Premium und Heavy Duty für mindestens 60 °C dauerhafte Umgebungstemperatur ausgelegt.

Diese dauerhafte Temperaturbeständigkeit wird durch den kompakten Aufbau der FRAKO Leistungs-Kondensatoren und die damit verbundene optimierte Wärmeabfuhr begünstigt.

## Wartungsfreier Kondensatoranschluss

Das Anschlusssteil (AKD) basiert auf der bewährten Technologie der Wago CageClamp®. Hierbei handelt es sich um einen Federzug-Mechanismus, der eine einfache, rüttelsichere und wartungsfreie Verbindung zum Kondensator sicherstellt. Es können sowohl ein-drähtige als auch mehr- oder feindrähtige Kupferleiter zum Anschluss verwendet werden. Das AKD erfüllt die Anforderungen der Schutzart IP20 nach DIN EN 60529 und gilt somit als „fingersicher“.



**Bild 27:** Patentierter Anschlussklemmenblock

## ■ 5.2: Blindleistungsregler



**Bild 28:** Blindleistungsregler PQC

Die intelligente Arbeitsweise sorgt dafür, dass die Soll-Werte mit minimalst möglichen Schaltungen geregelt und eingehalten werden. Dies minimiert den Verschleiß der Kompensationsanlage und reduziert Rückwirkungen auf das Netz. Je nach Ausführung schützen die Regler die Kompensationsanlage vor zu hohem Oberschwingungsgehalt durch Abschaltung. Außerdem schätzen unsere Kunden die anwenderfreundliche Bedienung unserer Regler.

### **Blindleistungsregler mit Power Quality Überwachung**

Der neue Power Quality Controller PQC kombiniert die bekannten Stärken der FRAKO Blindleistungsregler mit neuer Funktionalität für die Anforderungen moderner Power-Quality-Lösungen.

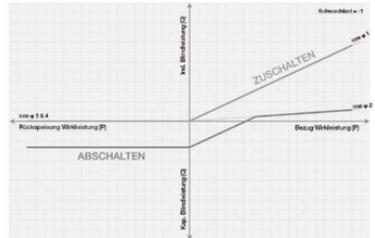
Mikroprozessorgesteuert übernimmt der PQC Aufgaben, die über die klassische Blindleistungs-Kompensation hinausgehen. Insbesondere wurden neue Schutzmechanismen für das zu kompensierende Netz wie auch die regelnde Blindleistungs-Regelanlage eingeführt. So überwacht der PQC Regler die relevanten Parameter, die im Netz Störungen verursachen können mit normgerechten Grenzwerten und meldet Grenzwertverletzungen. Außerdem schützt der PQC die zu regelnde Kompensationsanlage indem er sie im Falle von Überlastung abschaltet. Dadurch wird das Risiko von Zerstörungen innerhalb der Kompensationsanlage deutlich reduziert. Defekte oder teildefekte Kondensatorstufen werden erkannt und aus dem Regelprozess herausgenommen. Ein äußerst flexibles Alarmmanagement sorgt dafür, dass die Meldungen ereignisbasiert dort hingehen, wo sie benötigt werden. Dank der individuellen Parametrierbarkeit ist der PQC universell einsetzbar, was ihn zum optimalen Controller für Power Quality in modernen Industrienetzen macht.

Einfachste Montage, intuitive Bedienung und die von den FRAKO Blindleistungsreglern bekannte selbständige Inbetriebnahme unterstützen den Anwender ebenso wie die integrierte Eigenüberwachung, die langfristig für mehr Betriebssicherheit sorgt und dadurch hilft Kosten zu senken und das Risiko von Netzstörungen zu minimieren.

- Die intelligenten FRAKO Blindleistungsregler messen sich automatisch auf die angeschlossene Kompensationsanlage und das zu kompensierende Netz ein. Fehlerhafte Programmierung wird dadurch automatisch vermieden.
- Fehlerhafte Anschlüsse oder fehlerhafte Platzierung der Messwandler werden identifiziert und angezeigt. Zeit- und kostenaufwändige Fehlersuche wird dadurch vermieden.
- Universelle Regelkennlinien bieten Kompensations-Strategien für jede denkbare Anforderung in allen 4 Regelquadranten. Neben der Vermeidung von Blindstromkosten ergeben sich weitere Vorteile wie:
  - Reduzierung von Verlusten in Verbraucher- und Stromversorgungsnetzen
  - Ertragssteigerung bei Erzeugungsanlagen
  - Minimierung des Anlagenverschleißes.

## Wichtige Features

- 1- oder 3-phasige Messung
- 4-Quadranten Regelung
- 6 oder 12 Schaltausgänge + 1 Alarmkontakt
- 5 parametrierbare Regelkennlinien
- Mehrsprachiges Klartextmenü mit graphischer Benutzerführung
- Integrierte Überwachung der Anlagenparameter mit Verarbeitung im Alarmmanagement



**Bild 29:** Beispiel für eine Regelkennlinie zur verschleißreduzierten Kompensation mit Ziel- $\cos \varphi$  bei Bezug induktiv und bei Rückspesung kapazitiv.

## Anwendungsempfehlung

Der PQC eignet sich für die 4-Quadranten Blindleistungs-Regelung in:

- Verbrauchernetzen
- Erzeugernetzen
- Nieder- und Mittelspannungsnetzen
- Verdrosselten und unverdrosselten Kompensationsanlagen

## Bedienung des PQC

Der PQC verfügt über ein hintergrundbeleuchtetes, monochromes LC Display mit 128 x 64 Pixeln, sowie 5 Tasten, die zur Navigation durch die mehrsprachige (deutsch, englisch, französisch) Klartext-Menüs dienen.

Der intuitive Aufbau der Menüstruktur ermöglicht eine einfache Programmierung des PQC. Die wichtigsten Informationen zu den einzelnen Phasen sowie dem Status der Schaltausgänge werden in der Reglerübersicht im Display dargestellt. Der Bediener erhält so alle relevanten Informationen und kann sich dadurch einen Überblick über die Kompensationsanlage verschaffen. Unterstützt durch das intelligente Alarmmanagement erhält der Bediener wichtige Meldungen und steuert deren Ausgabe auf das Display oder den Alarmkontakt.

## Betrieb des PQC

Bei der ersten Inbetriebnahme ermittelt der PQC seine Anschlusskonfiguration sowie die genutzten Schaltausgänge inklusive deren Wertigkeit (angeschlossene kVAr). Der Bediener wählt das auf die Anwendung zutreffende Regelprofil oder parametriert den PQC gemäß den Anforderungen. Ab Werk sind bereits 5 Regelprofile hinterlegt, die speziell für die gängigsten Anwendungen entwickelt wurden. Nach Abschluss der Inbetriebnahme arbeitet der PQC und schaltet entsprechend der Kennlinienvorgabe die angeschlossenen Schaltstufen zu oder ab.

Netzwerke	
cos $\varphi$	0.982
U	385.5V I 709.4A
P	465.2kW S 473.7kVA
Q	89.0kvar
$\Sigma$	L

**Bild 30:** PQC-Display Netzwerke

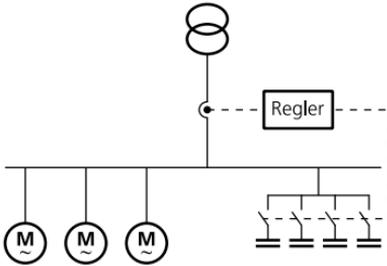
Schaltausgänge						
Stufe:	1	2	3	4	5	6
	⌋	x	x	⌋	⌋	x
	7	8	9	10	11	12
	⌋	H	x	⌋	⌋	H

**Bild 31:** PQC-Display Status Schaltausgänge

# Kapitel 6: Installation

## ■ 6.1: Stromwandler

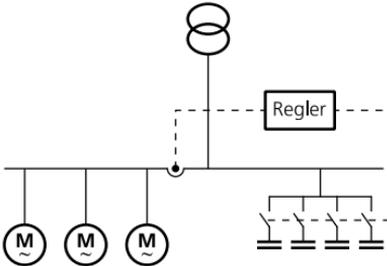
Für den Betrieb von Blindleistungs-Regelanlagen ist ein Stromwandler erforderlich. Dieser ist im Lieferumfang **nicht** enthalten, kann jedoch nach Klärung der kundenseitigen Erfordernisse mitgeliefert werden. Der Primärstrom des Wandlers wird durch die Stromaufnahme der Verbraucher bestimmt. Die Auslegung richtet sich nach der maximalen Strombelastung bzw. nach dem Anschlusswert des Transformators. Der Strompfad des Blindleistungsreglers ist für einen Stromwandler .../1 bis .../5 A mit einer Leistung von 5 VA, Klasse 3 ausgelegt. Werden Strommessgeräte in Reihe zum Regler geschaltet, muss ein Wandler mit entsprechend höherer Leistung verwendet werden. Der Eigenverbrauch im Regler-Strompfad beträgt ca. 1,8 VA bei 5 A Wandler-Nennstrom.



**Bild 32: Richtig** angeordneter Stromwandler, er erfasst Verbraucher- und Kondensatorstrom

Falls am selben Wandler weitere Messgeräte betrieben werden sollen, muss dies bei der Auslegung seiner Leistung (Bürde) berücksichtigt werden.

Auch in den Stromwandler-Leitungen treten Verluste auf, die bei längeren Strecken zwischen Wandler und Blindleistungsregler gleichfalls beachtet werden müssen.



**Bild 33: Falsch!** Der Wandler erfasst nur Verbraucherstrom, die Anlage schaltet zu, aber nicht wieder ab (kein Kondensatorstrom messbar!)

### Eigenverbrauch von Wandlerleitungen

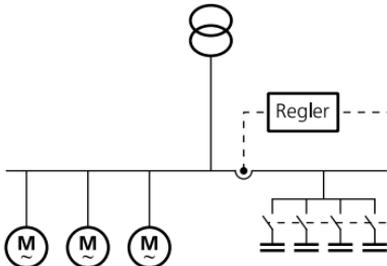
auf 5 A Kupfer, bezogen auf 5 A Sekundärstrom:

Querschnitt in mm <sup>2</sup>	Eigenverbrauch je 1 m Doppelleitung in VA
2,5	0,36
4,0	0,22
6,0	0,15
10,0	0,09

Die **Berechnungsformel** zur Stromwandlerdimensionierung finden Sie auf [Seite 31](#).

**Wichtig:** Der Stromwandler muss in einem Außenleiter so eingebaut werden, dass er vom gesamten Strom der zu kompensierenden Verbraucher und vom Kondensatorstrom durchflossen wird (beachten Sie bitte die nebestehenden Bilder). Anschluss P1 (K) liegt auf der Seite der Einspeisung, der Anschluss P2 (L) auf der Seite der Verbraucher.

**Vorsicht:** Bei Unterbrechung des Strompfades treten Überspannungen auf, die den Wandler zerstören können. Schließen Sie daher vor dem Öffnen des Wandlerkreises die Anschlüsse S1 (k) und S2 (l) kurz.



**Bild 34: Falsch!** Der Wandler erfasst nur Kondensatorstrom, die Anlage schaltet nicht zu (kein Strom im Wandlerkreis!)

## ■ 6.2: Sicherungen und Kabel

Für die Ausführung der Installationsarbeiten sind die Vorschriften VDE 0100, VDE 0105, die allgemeinen Richtlinien der VDEW und die Anschlussbedingungen des zuständigen EVU zu beachten. Nach VDE 0560 Teil 46 müssen: "Kondensatoreinheiten für einen Dauer-Effektivstrom vom 1,3-fachen des Stromes geeignet sein, der sich bei sinusförmiger Nennspannung und Nennfrequenz einstellt". Unter Berücksichtigung der Kapazitätstoleranz von  $1,1 \times C_N$  kann der maximal zulässige Strom Werte bis  $1,38 \times I_N$  erreichen. Diese Überlastbarkeit sowie der hohe Einschaltstrom der Kondensatoren sind bei der Dimensionierung von Sicherungen und Kabelquerschnitten zu berücksichtigen.

**Wichtig:** FRAKO Leistungs-Kondensatoren bieten eine Strombelastbarkeit von bis zu  $2,7 \times I_N$ .

**Tabelle 5:** Sicherungen und Zuleitungsquerschnitte nach VDE0298 Teil 4, Verlegeart C

Leistung in kVAr	400 V/50 Hz			525 V/50 Hz			690 V/50 Hz		
	Strom		Querschnitt in mm <sup>2</sup>	Strom		Querschnitt in mm <sup>2</sup>	Strom		Querschnitt in mm <sup>2</sup>
	Sicherung			Sicherung			Sicherung		
	in A	in A		in A	in A		in A	in A	
2,5	3,6	10	4 x 1,5	2,7	10	4 x 1,5	2,1	10	4 x 1,5
5	7,2	10	4 x 1,5	5,5	10	4 x 1,5	4,2	10	4 x 1,5
6,25	9,0	16	4 x 2,5	6,9	10	4 x 1,5	5,2	10	4 x 1,5
7,5	10,8	16	4 x 2,5	8,2	16	4 x 2,5	6,3	10	4 x 1,5
10	14,4	20	4 x 2,5	11,0	16	4 x 2,5	8,4	16	4 x 2,5
12,5	18,0	25	4 x 4	13,7	20	4 x 2,5	10,5	16	4 x 2,5
15	21,7	35	4 x 6	16,5	25	4 x 4	12,6	20	4 x 2,5
17,5	25,3	35	4 x 6	19,2	35	4 x 6	14,6	25	4 x 4
20	28,9	50	4 x 10	22,0	35	4 x 6	16,7	25	4 x 4
25	36,1	50	4 x 10	27,5	50	4 x 10	20,9	35	4 x 6
27,5	39,7	63	4 x 16	30,2	50	4 x 10	23,0	35	4 x 6
30	43,3	63	4 x 16	33,0	50	4 x 10	25,1	35	4 x 6
31,25	45,1	63	4 x 16	34,4	50	4 x 10	26,1	50	4 x 10
37,5	54,1	80	3 x 25/16	41,2	63	4 x 16	31,4	50	4 x 10
40	57,7	80	3 x 25/16	44,0	63	4 x 16	33,5	50	4 x 10
43,75	63,1	100	3 x 35/16	48,1	80	3 x 25/16	36,6	63	4 x 16
45	65,0	100	3 x 35/16	49,5	80	3 x 25/16	37,7	63	4 x 16
50	72,2	100	3 x 35/16	55,0	80	3 x 25/16	41,8	63	4 x 16
52,5	75,8	125	3 x 50/25	57,7	80	3 x 25/16	43,9	63	4 x 16
60	86,6	125	3 x 50/25	66,0	100	3 x 35/16	50,2	80	3 x 25/16
62,5	90,2	125	3 x 50/25	68,7	100	3 x 35/16	52,3	80	3 x 25/16
67,5	97,4	160	3 x 70/35	74,2	125	3 x 50/25	56,5	80	3 x 25/16
68,75	99,2	160	3 x 70/35	75,6	125	3 x 50/25	57,5	80	3 x 25/16
75	108,3	160	3 x 70/35	82,5	125	3 x 50/25	62,8	100	3 x 35/16
87,5	126,3	200	3 x 95/50	96,2	160	3 x 70/35	73,2	125	3 x 50/25
93,75	135,3	200	3 x 95/50	103,1	160	3 x 70/35	78,4	125	3 x 50/25
100	144,3	200	3 x 95/50	110,0	160	3 x 70/35	83,7	125	3 x 50/25
112,5	162,4	250	3 x 120/70	123,7	200	3 x 95/50	94,1	160	3 x 70/35
125	180,4	250	3 x 120/70	137,5	200	3 x 95/50	104,6	160	3 x 70/35
150	216,5	315	3 x 185/95	165,0	250	3 x 120/70	125,5	200	3 x 95/50
175	252,6	400	2x 3 x 95/50	192,5	315	3 x 185/95	146,4	250	3 x 120/70
200	288,7	400	2x 3 x 95/50	219,9	315	3 x 185/95	167,3	250	3 x 120/70
225	324,8	500	2x 3 x 120/70	247,4	400	2x 3 x 95/50	188,3	315	3 x 185/95
250	360,8	500	2x 3 x 120/70	274,9	400	2x 3 x 95/50	209,2	315	3 x 185/95
275	396,9	630	2x 3 x 185/95	302,4	500	2x 3 x 120/70	230,1	400	2x 3 x 95/50
300	433,0	630	2x 3 x 185/95	329,9	500	2x 3 x 120/70	251,0	400	2x 3 x 95/50
350	505,2	800	2x 3 x 240/120	384,9	630	2x 3 x 185/95	292,9	500	2x 3 x 120/70
375	541,3	800	2x 3 x 240/120	412,4	630	2x 3 x 185/95	313,8	500	2x 3 x 120/70
400	577,4	800	2x 3 x 240/120	439,9	630	2x 3 x 185/95	334,7	500	2x 3 x 120/70
500	721,7	1000	3x 3 x 185/95	549,9	800	2x 3 x 240/120	418,4	630	2x 3 x 185/95

**Tabella 6: Außendurchmesser von Kabeln und Leitungen**

Leiterquerschnitt in mm <sup>2</sup>	NYM Ø in mm	NYY Ø in mm	NYCY/NYCWY Ø in mm	H05VV-F Ø in mm	H07RN-F Ø in mm
2 x 1,5	9,0	11,0	12,0	10,5	11,5
2 x 2,5	10,5	13,0	14,0	12,5	13,5
3 x 1,5	10,0	11,0	13,0	11,0	12,5
3 x 2,5	11,0	13,0	14,0	13,0	14,5
3 x 4,0	12,5	15,0	16,0	-	16,0
3 x 6,0	14,0	16,0	17,0	-	20,0
3 x 10,0	17,0	19,0	18,0	-	25,5
3 x 16,0	20,0	21,0	21,0	-	29,0
4 x 1,5	10,5	13,0	14,0	12,5	13,5
4 x 2,5	12,0	14,0	15,0	14,0	15,5
4 x 4,0	14,0	16,0	17,0	-	18,0
4 x 6,0	15,0	17,0	18,0	-	22,0
4 x 10,0	18,0	20,0	20,0	-	28,0
4 x 16,0	23,0	23,0	23,0	-	32,0
4 x 25,0	27,5	27,0	28,0	-	37,0
4 x 35,0	31,0	30,0	29,0	-	42,0
4 x 50,0	-	35,0	34,0	-	48,0
4 x 70,0	-	40,0	37,0	-	54,0
4 x 95,0	-	45,0	42,0	-	60,0
4 x 120,0	-	50,0	47,0	-	-
4 x 150,0	-	53,0	52,0	-	-
4 x 185,0	-	60,0	60,0	-	-
4 x 240,0	-	71,0	70,0	-	-
5 x 1,5	11,0	13,5	15,0	13,5	15,0
5 x 2,5	13,0	15,0	17,0	15,5	17,0
5 x 4,0	15,0	16,5	18,0	-	19,0
5 x 6,0	18,0	19,0	20,0	-	24,0
5 x 10,0	20,0	21,0	-	-	30,0
5 x 16,0	24,0	23,0	-	35,0	-
7 x 1,5	-	13,5	-	-	-
10 x 1,5	-	17,0	-	-	-
12 x 1,5	-	17,5	-	-	-
14 x 1,5	-	18,0	-	-	-
16 x 1,5	-	19,0	-	-	-
24 x 1,5	-	23,0	-	-	-

NYM: Mantelleitung

NYY: Kabel mit Kunststoffmantel

NYCY: Kabel mit konzentrischem Leiter und Kunststoffmantel

NYCWY: Kabel mit konzentrischem, wellenförmigem Leiter und Kunststoffmantel

H05VV-F: Leichte Gummischlauchleitung (NLH, NMH)

H07RN-F: Schwere Gummischlauchleitung (NSH)

**Tabella 7:** Leitungseinführung mittels Kabelverschraubungen

Metrisches Gewinde	Pg	Leitungsaußen-durchmesser in mm	Durchgangs-bohrung
M 16 x 1,5	11	6,5 - 10,5	19,0
-	13,5	8,0 - 12,5	21,0
M 20 x 1,5	16	10,0 - 15,0	23,0
M 25 x 1,5	21	12,0 - 20,0	29,0
M 32 x 1,5	29	19,0 - 26,5	38,0
M 40 x 1,5	36	29,0 - 34,0	48,0
-	42	34,0 - 41,0	55,0
M 50 x 1,5	48	40,0 - 45,0	60,0

### ■ 6.3: Schutzart

Für die Schutzarten-Kennzeichnung nach EN 60529, werden zwei Buchstaben und eine zweistellige Zahl verwendet. IP steht für "International Protection" (Protection = Sicherheit).

Die gebräuchlichsten Kurzzeichen:

**Tabella 8:** Bedeutung der Kurzzeichen für Schutzarten

Schutzart	Berührungsschutz	Schutz gegen Fremdkörper	Wasserschutz
IP 00	keinen	keinen	keinen
IP 10	gegen zufälliges oder versehentliches Berühren	über 50 mm Durchmesser	keinen
IP 20	mit Fingern und Gegenständen max. 80 mm lang	über 12,5 mm Durchmesser	keinen
IP 30	mit Werkzeugen und Drähten mit Dicke > 2,5 mm	über 2,5 mm Durchmesser	keinen
IP 31	mit Werkzeugen und Drähten mit Dicke > 2,5 mm	über 2,5 mm Durchmesser	gegen senkrecht fallendes Tropfwasser
IP 40	mit Drähten oder Bändern mit Dicke > 1 mm	über 1 mm Durchmesser	keinen
IP 41	mit Drähten oder Bändern mit Dicke > 1 mm	über 1 mm Durchmesser	gegen senkrecht fallendes Tropfwasser
IP 42	mit Drähten oder Bändern mit Dicke > 1 mm	über 1 mm Durchmesser	gegen Tropfwasser, bis 15° gegen die Senkrechte
IP 43	mit Drähten oder Bändern mit Dicke > 1 mm	über 1 mm Durchmesser	gegen Sprühwasser, bis 60° gegen die Senkrechte
IP 54	vollständiger Schutz	Staubablagerung	gegen Spritzwasser aus allen Richtungen
IP 65	vollständiger Schutz	Staubeintritt	gegen Wasserstrahl aus allen Richtungen

# Kapitel 7: Berechnungsformeln

Es bedeuten:  $Q_C$  = Kondensatorleistung in VAR  
 $U$  = Spannung in V  
 $f_n$  = Netzfrequenz in Hz  
 $n$  = Anzahl

$C$  = Kapazität eines Kondensators in F (Farad)  
 $\pi$  = Kreiszahl Pi (3,1415926...)  
 $p$  = Verdrosselungsfaktor

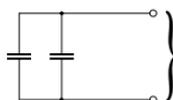
Kondensatorleistung  
 1-phasig



$$Q_C = C \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Beispiel: 83  $\mu\text{F}$  bei 400V/50 Hz  
 $0,000083 \cdot 400^2 \cdot 314,16 = 4.172 \text{ VAR} = 4,17 \text{ kVAR}$

Kondensatorleistung  
 1-phasig,  
 Parallelschaltung  
 von  $n$  Kondensatoren



$$Q_C = n \cdot C \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Beispiel: 2x83  $\mu\text{F}$  bei 400V/50 Hz  
 $2 \cdot 0,000083 \cdot 400^2 \cdot 314,16 = 8.344 \text{ VAR} = 8,34 \text{ kVAR}$

Kondensatorleistung  
 1-phasig,  
 Reihenschaltung  
 von  $n$  Kondensatoren



$$Q_C = \frac{C \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n}{n}$$

Beispiel: 2x83  $\mu\text{F}$  bei 400V/50 Hz  
 $0,000083 \cdot 400^2 \cdot 314,16 / 2 = 2.086 \text{ VAR} = 2,09 \text{ kVAR}$

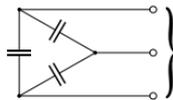
Kondensatorleistung  
 1-phasig,  
 verdrosselt



$$Q_C = \frac{C \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n}{1-p}$$

Beispiel: 171,3  $\mu\text{F}$  bei 400V/50 Hz, mit 14% verdrosselt  
 $0,0001713 \cdot 400^2 \cdot 314,16 / 0,86 = 10 \text{ kVAR}$

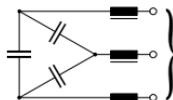
Kondensatorleistung  
 3-phasig,  
 in Dreieckschaltung



$$Q_C = 3 \cdot C \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Beispiel: 3x332  $\mu\text{F}$  bei 400V/50 Hz  
 $3 \cdot 0,000332 \cdot 400^2 \cdot 314,16 = 50 \text{ kVAR}$

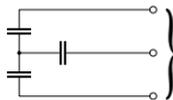
Kondensatorleistung  
 3-phasig,  
 in Dreieckschaltung,  
 verdrosselt



$$Q_C = \frac{3 \cdot C \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n}{1-p}$$

Beispiel: 3x332  $\mu\text{F}$  bei 400V/50 Hz, mit 7% verdrosselt  
 $3 \cdot 0,000332 \cdot 400^2 \cdot 314,16 / 0,93 = 53,8 \text{ kVAR}$

Kondensatorleistung  
 3-phasig,  
 in Sternschaltung



$$Q_C = C_{Strang} \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n$$

Beispiel: 3x1x124,4  $\mu\text{F}$  bei 400V/50 Hz  
 $0,0001244 \cdot 400^2 \cdot 314,16 = 6,25 \text{ kVAR}$

Kondensatorleistung  
 3-phasig,  
 in Sternschaltung,  
 verdrosselt



$$Q_C = \frac{C_{Strang} \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n}{1-p}$$

Beispiel: 3x1x115,7  $\mu\text{F}$  bei 400V/50 Hz, mit 7% verdrosselt  
 $0,0001157 \cdot 400^2 \cdot 314,16 / 0,93 = 6,25 \text{ kVAR}$

Es bedeuten:  $U$  = Spannung in V  
 $I$  = Außenleiterstrom in A  
 $P$  = Wirkleistung in W  
 $Q$  = Blindleistung in VAR  
 $S$  = Scheinleistung in VA  
 $Q_C$  = Kondensatorleistung in VAR

$f_n$  = Netzfrequenz in Hz  
 $f_r$  = Reihenresonanzfrequenz in Hz  
 $p$  = Verdrosselungsfaktor in %  
 $l$  = Leitungslänge (Doppelleitung) in m  
 $q_{cu}$  = Leitungsquerschnitt in mm<sup>2</sup>  
 $P_v$  = Leitungsverlustleistung in VA

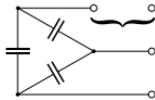
Kondensatorstrom  
im Außenleiter  
1-phasig



$$Q_C = I \cdot U \quad \text{oder:} \quad I = \frac{Q_C}{U}$$

Beispiel: 25 kVAR bei 400V  
 $25.000 / 400 = 62,5 \text{ A}$

Kondensatorstrom  
im Außenleiter  
3-phasig



$$Q_C = I \cdot U \cdot \sqrt{3} \quad \text{oder:} \quad I = \frac{Q_C}{U \cdot \sqrt{3}}$$

Beispiel: 25 kVAR bei 400V  
 $25.000 / (400 \cdot 1,73) = 36 \text{ A}$

Leistungsfaktor  
und Umrechnung  
cos und tan

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \text{oder:} \quad \cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \varphi}} \quad \text{oder:} \quad \cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{Q}{P}\right)^2}}$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad \text{oder:} \quad \tan \varphi = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1} \quad \text{oder:} \quad \tan \varphi = \sqrt{\left(\frac{P}{S}\right)^2 - 1}$$

Reihenresonanzfrequenz ( $f_r$ )  
und Verdrosselungsfaktor ( $p$ )  
von verdrosselten Kondensatoren

$$f_r = f_n \cdot \sqrt{\frac{1}{p}} \quad \text{oder:} \quad p = \left(\frac{f_n}{f_r}\right)^2$$

Beispiel:  $p = 0,07$  (7% Verdrosselung) im 50 Hz Netz  
 $f_r = 189 \text{ Hz}$

Stromwandler  
Leistungsberechnung (Bürde)

$$P_v = \frac{I^2 \cdot l \cdot 2}{q_{cu} \cdot 56}$$

Beispiel 1 Wandlerübersetzung: ... / 5A  
20 m Kupfer-Messkabel (Doppelleitung) 2,5 mm<sup>2</sup>  
Blindleistungsregler mit 1,8 VA Verbrauch im Messeingang:  
 $(S^2 \cdot 40 / 2,5 / 56) + 1,8 = 8,94 \text{ VA} = \text{Wandler: } 10 \text{ VA}$

Beispiel 2 Wandlerübersetzung: ... / 1A  
150 m Kupfer-Messkabel (Doppelleitung) 2,5 mm<sup>2</sup>  
Messgerät mit 1,2 VA Verbrauch im Stromeingang:  
 $(I^2 \cdot 300 / 2,5 / 56) + 1,2 = 3,34 \text{ VA} = \text{Wandler: } 5 \text{ VA}$

# Kapitel 8: Power-Quality

## ■ 8.1: Was sind Oberschwingungen?

In modernen Niederspannungsnetzen findet man zunehmend Verbraucher, die dem Netz einen nichtsinusförmigen Strom entnehmen. Diese Verbraucherströme erzeugen an den Netzimpedanzen einen Spannungsabfall, der die ursprünglich sinusförmige Netzspannung verzerrt. Diese Überlagerungen können nach Fourier in die Grundschwingung (Netzfrequenz) und die einzelnen Oberschwingungen (Harmonische) zerlegt werden. Die Frequenzen der Oberschwingungen sind ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung und werden mit der Ordnungszahl „n“ oder „v“ gekennzeichnet (Beispiel: Netzfrequenz = 50 Hz → 5. Harmonische = 250 Hz; Netzfrequenz = 60 Hz → 5. Harmonische = 300 Hz).

**lineare Verbraucher** sind:

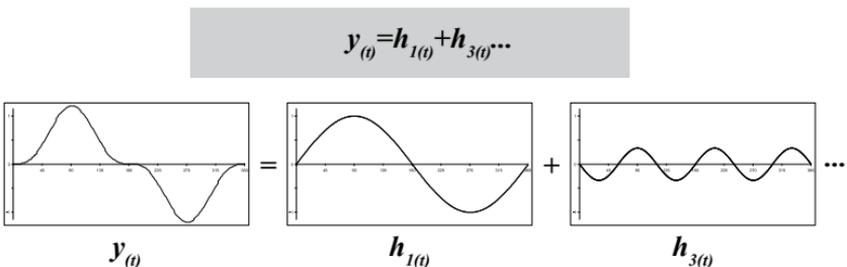
- ohmsche Widerstände (Widerstandsheizungen, Glühlampen etc.)
- Drehstrommotoren
- Kondensatoren

**nichtlineare Verbraucher** (Oberschwingungserzeuger) sind:

- Transformatoren und Drosseln
- Stromrichter
- Gleich- und Umrichter, besonders bei drehzahlgeregelten Asynchronmaschinen
- Induktions- und Lichtbogenöfen, Schweißgeräte
- unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV-Anlagen)
- Einphasige, getaktete Stromversorgungen für moderne elektronische Verbraucher, wie Fernseher, Ladegeräte, Computer, Bildschirme, Drucker, Faxgeräte, elektronische Vorschaltgeräte, Energiesparleuchten, Netzteile für LED-Lampen ...

Jedes periodische Signal der Frequenz „f“, (unabhängig von der Kurvenform) besteht aus der Summe:

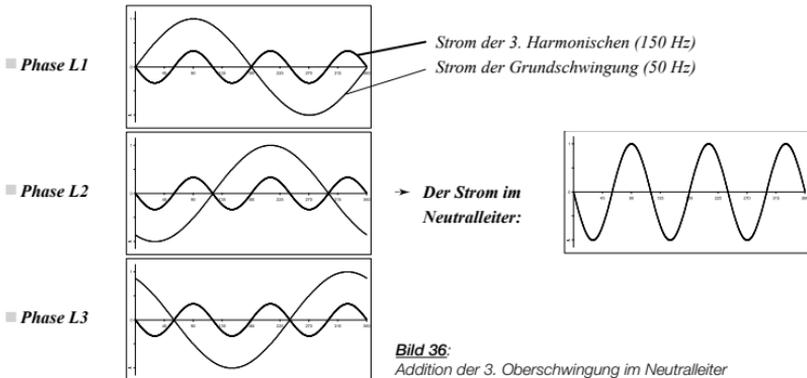
- der Sinuskomponente der Frequenz „f“, genannt "Grundschwingung" oder „ $h_1$ “.
- den Sinuskomponenten der ganzzahligen, mehrfachen Frequenz „f“, genannt "Harmonische" „ $h_n$ “.
- und ggf. einer DC Komponente (falls vorhanden).



**Bild 35:** Aufteilung eines periodischen Signals in Harmonische

Oberschwingungen können unterteilt werden in:

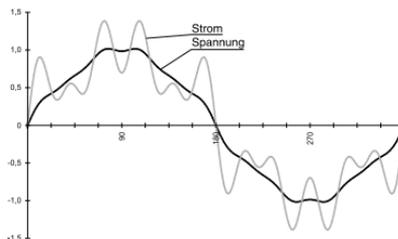
- **geradzahlige Harmonische** (2., 4., 6. usw.)  
entstehen bei großen Lastsprüngen oder Fehler in Umrichtern
- **ungeradzahlige Harmonische** (3., 5., 7. usw.)
  - **durch 3 teilbare Harmonische** (3., 9., 15. usw.)  
entstehen durch unsymmetrische Last und einphasige OS-Erzeuger  
Typisch: Bürogebäude, Krankenhäuser, Softwarehäuser, Banken ...  
Fabriken mit zweiphasigen Schweißanlagen  
Problem: diese Oberschwingungen addieren sich im Neutralleiter!



- **nicht durch 3 teilbare Harmonische** (5., 7., 11., 13. usw.)  
entstehen durch dreiphasige Oberschwingungserzeuger  
5. und 7. Oberschwingung: beim Einsatz von 6-pulsigen Umrichtern  
11. und 13. Oberschwingung: beim Einsatz von 12-pulsigen Umrichtern  
Problem: die Oberschwingungen werden über den Transformator übertragen!

Der Gesamtüberschwingungspegel **THD** (Total Harmonic Distortion) ergibt sich aus der geometrischen Summe aller vorhandenen Oberschwingungen, steht in der Regel im Verhältnis zur Grundschwingung - der THD erlaubt einen schnellen Überblick über die Netzqualität.

Jede Oberschwingung ist für sich als eigenes System mit unterschiedlicher Phasenlage zu sehen! Daraus ergibt sich eine generelle Differenz zwischen **cos φ** (der Grundschwingung) und **PF** (oder  $\lambda$  = Powerfactor, über die geometrische Summe aller Oberschwingungen).



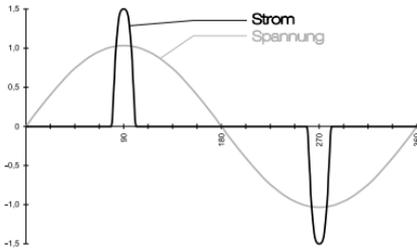
Oberschwingungen werden nicht nur in Industrienetzen, sondern auch zunehmend in privaten Haushalten erzeugt.

Von den Oberschwingungserzeugern werden in der Regel nur ungeradzahlige Harmonische eingespeist, es treten daher hauptsächlich die 3., 5., 7., 9., 11. usw. Harmonische auf.

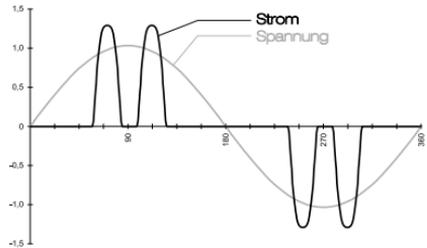
**Bild 37:** Netzstrom und -spannung mit einer Überlagerung von: 5% der 5. Oberschwingung, 4% der 7. Oberschwingung und 2,5% der 11. Oberschwingung

## ■ 8.2: Wie entstehen Oberschwingungen?

Im industriellen Niederspannungsnetz, besonders wenn geregelte Antriebe installiert sind - und: in jedem Haushalt: in jedem Fernseher, Computer und in Kompakt-Energiesparleuchten mit elektronischem Vorschaltgerät. Durch die Vielzahl dieser Verbraucher und durch die phasengleichen Ströme entstehen in den Abendstunden oft hohe Oberschwingungspegel in den Mittelspannungsnetzen.



**Bild 38:** Strom und Spannung eines Schaltnetzteils



**Bild 39:** Strom und Spannung eines B6-Umrichters

## ■ 8.3: Wie hoch sind diese Oberschwingungen, wenn noch keine Kompensationsanlage installiert ist?

### a) im eigenen Niederspannungsnetz:

je nach Leistung der installierten Umrichter und Stromrichter.

Wenn z. B. ein großer 6-puls-Umrichter im Netz installiert ist, dessen Leistung 50% der Trafo-Nennleistung beträgt, dann entstehen dadurch etwa

- 4% der 5. Harmonischen (250 Hz) und
- 3% der 7. Harmonischen (350 Hz)

Üblicher ist es, dass mehrere nicht miteinander gekoppelte kleine Stromrichter in einem Netz installiert sind. Durch die unterschiedliche Phasenlage der Ströme der einzelnen Stromrichter sind die resultierenden Oberschwingungs-Spannungen geringer.

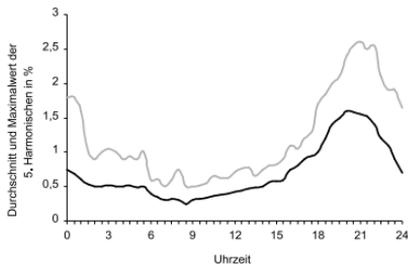
Wenn z. B. mehrere Stromrichter mit einer Leistung von zusammen ca. 25% der Trafo-Nennleistung installiert sind, entstehen dadurch ca.

- 1 - 1,5% der 5. Harmonischen und
- 0,7 - 1% der 7. Harmonischen.

Dies sind Richtwerte für eine erste Abschätzung, ob eine verdrosselte Kompensationsanlage installiert werden muss.

### b) im Mittelspannungsnetz:

Dies wird heute in den meisten Netzen überwiegend durch die Oberschwingungserzeuger in den privaten Haushalten (im wesentlichen Fernsehgeräte) beeinflusst, was sich auch am Tagesverlauf der 5. Oberschwingung verdeutlicht:



**Bild 40:** Durchschnitt und Maximalwert der 5. Harmonischen im Mittelspannungsnetz einer Stadtversorgung

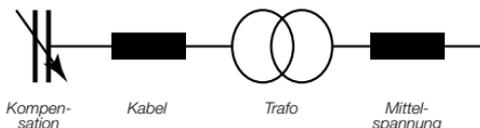
Der Oberschwingungspegel im Mittelspannungsnetz einer Stadtversorgung mit Industrieanteil an Werktagen.

Durchschnittswert und Maximalwert einer Messreihe, die in den Jahren 1985-87 von der FGH durchgeführt wurde. Diese Werte sind heute mit Sicherheit höher. Der Anstieg am Abend rührt von der Vielzahl von Fernsehern und anderen nichtlinearen Verbrauchern in den privaten Haushalten.

In Ballungsgebieten können der Mittelspannung in den Abendstunden über **4% 250 Hz** und bis ca. **1,5% 350 Hz** überlagert sein. Die höheren Harmonischen sind meist vernachlässigbar. Der Pegel ist nur begrenzt vorhersehbar!

#### ■ 8.4: Welchen Einfluss hat eine Kompensation in einem Netz mit Oberschwingungen?

Eine unverdrosselte Kompensationsanlage bildet mit den reaktiven Netzimpedanzen einen Schwingkreis. Für die Resonanzfrequenz gibt es eine einfache Faustformel:



$$f_r = 50 \text{ Hz} \cdot \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}}$$

$f_r$ : Resonanzfrequenz  
 $S_k$ : Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt der Kompensationsanlage  
 $Q_c$ : Leistung der Kompensationsanlage

Die Kurzschlussleistung  $S_k$  am Anschlusspunkt der Kompensationsanlage wird

- im wesentlichen durch den Trafo bestimmt ( $S_n / u_k$ ),
- um etwa 10% durch die Impedanz des Mittelspannungsnetzes reduziert
- kann stark durch lange Zuleitungen zwischen Trafo und Kompensation reduziert werden.

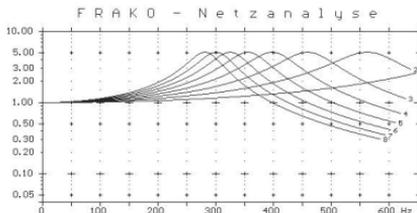
#### Beispiel:

- Trafo 1000 kVA,  $u_k = 6\%$
- Kurzschlussleistung des Mittelspannungsnetzes 150 MVA,  $S_k \approx 2,6 \text{ MVA}$
- Kompensation 400 kVAr in 8 Stufen, unverdrosselt

Kondensatorleistung ( $Q_c$ )	Resonanzfrequenz ( $f_r$ )
100 kVAr	562 Hz
250 kVAr	355 Hz
400 kVAr	281 Hz

Beim Zuschalten der Stufen der Kompensationsanlage verändert sich die Resonanzfrequenz „ $f_r$ “ des Netzes erheblich und ist mehrfach in der Nähe der Frequenz einer Netzoberschwingung.

Ist die Eigenresonanz dieses Schwingkreises in der Nähe einer vorhandenen Netzoberschwingung, so sind resonanzbedingte Anhebungen der Oberschwingungsspannungen zu erwarten. Unter Umständen können diese bis zum Faktor der Netzgüte (in Industrienetzen ca. 5-10!) multipliziert werden:



**Bild 41:** Verstärkungsfaktor der Oberschwingungsspannungen bei einer unverdrosselten Kompensation am Niederspannungsnetz

### ■ 8.5: Wann können gefährliche Netzresonanzen auftreten?

Anhand des vorstehenden Diagramms kann abgeschätzt werden, ob Resonanzprobleme mit Oberschwingungen auftreten können, hierfür genügen einfache Regeln:

1.) Liegt die Resonanzfrequenz

- 10 % unter-/ oberhalb einer Netzoberschwingung, dann wird diese in einem Netz hoher Güte (z.B. abends und nachts) um **bis zu einem Faktor über 4 verstärkt**.
- 20 % oberhalb einer Netzoberschwingung, dann wird diese in einem Netz hoher Güte **deutlich, um einen Faktor bis zu 2,5 verstärkt**.
- 30 % oberhalb einer Netzharmonischen, dann wird diese nur gering, **um einen Faktor bis ca. 1,7 verstärkt**.

2.) In einem Netz ohne eigene Oberschwingungserzeuger, jedoch mit deutlichen Oberschwingungen auf dem Mittelspannungsnetz können

- bei einer Resonanzfrequenz unter 400 Hz Resonanzüberhöhungen der 7. Harmonischen,
- **bei einer Resonanzfrequenz unter 300 Hz gefährliche Resonanzüberhöhungen auf der 5. Harmonischen (250 Hz) auftreten.**

### ■ 8.6: Welchen Einfluss hat die Netzkonfiguration auf die Oberschwingungsproblematik?

Die Netzkurzschlussleistung bestimmt die Resonanzfrequenz und bei Oberschwingungserzeugern im eigenen Netz die Höhe der Oberschwingungen auf der Netzspannung.

- Problematisch ist eine **zu niedrige Netzkurzschlussleistung** am Anschlusspunkt der Kompensation.
- Problematisch ist eine **stark veränderte Kurzschlussleistung** aufgrund veränderter Schaltzustände.

#### **Beispiel:**

In vielen Großbetrieben werden die Niederspannungsstationen zur Sicherung der Energieversorgung über eine Ringleitung verbunden. Dieses Netz hat eine hohe Kurzschlussleistung. Auch bei größerer Kompensationsleistung und höherer Stromrichterlast bestehen kaum Oberschwingungsprobleme, da die Resonanzfrequenz hoch ist und die Oberschwingungsströme mit geringem Spannungsabfall ins Mittelspannungsnetz abfließen. Beim Auftrennen der Ringleitung, z. B. zu Wartungsarbeiten, sinkt die Kurzschlussleistung unter Umständen deutlich, die Resonanzfrequenz kann unter 300 Hz sinken!

### ■ 8.7: Spannungs- und Strombelastung unverdrosselter Kompensationsanlagen

Beim Auftreten einer Resonanz erhöht sich der Effektivwert der Netzspannung nur geringfügig, der Effektivwert des Kondensatorstroms jedoch erheblich. Bei einer Resonanz mit der 5. Harmonischen kann diese z. B. auf 15% ansteigen, dann erhöht sich:

- der Effektivwert der Netzspannung um 1%
- der Scheitelwert der Netzspannung um 10-15% (je nach Phasenlage)
- **der Effektivwert des Kondensatorstroms um 25%!**

Bei einer Resonanz mit der 11. Harmonischen kann diese z. B. auf 10% ansteigen, dann erhöht sich:

- der Effektivwert der Netzspannung um 0,5%
- der Scheitelwert der Netzspannung um 6-10%
- **der Effektivwert des Kondensatorstroms um 50%!**

Deshalb ist eine hohe **Strombelastbarkeit** der Kondensatoren eines der wichtigsten Qualitätsmerkmale!

**FRAKO Kondensatoren** sind bis zum **2,7-fachen** des **Nennstroms** dauernd **belastbar!**

# Kapitel 9: Projektierung in Netzen mit Oberschwingungen

## ■ 9.1: Was ist zu tun, wenn eine Resonanz möglich, aber wenig wahrscheinlich ist?

Darunter fällt heute ein wesentlicher Teil der projektierten Anlagen, z. B.:

- Keine eigenen Oberschwingungserzeuger im Netz, keine Oberschwingungen auf dem Mittelspannungsnetz, aber eine Resonanzfrequenz unter 400 Hz.
- Durch Verändern der Netzkonfiguration, z. B. bei Wartungsarbeiten, kann die Resonanzfrequenz unter 400 Hz sinken, auf dem Mittelspannungsnetz sind Oberschwingungen vorhanden.
- Es ist geplant, später Anlagen mit Stromrichtern anzuschaffen.

Um eine nicht verdrosselte Anlage vor dem Auftreten einer auch nur gelegentlichen Resonanz zu schützen, ist ein **Netzüberwachungsgerät** von FRAKO von größtem Nutzen. Es überwacht das Netz in allen 3 Außenleitern, setzt bei Überschreiten eines gefährlichen Oberschwingungspegels die Anlage außer Betrieb und schaltet sie automatisch bei Unterschreiten des kritischen Pegels wieder zu. Die aufgetretenen Maximalwerte bleiben gespeichert und können über eine Busschnittstelle ausgelesen werden.

In Netzen mit symmetrischer Belastung kann auch ein FRAKO-**Blindleistungsregler** eingesetzt werden. Er überwacht das Auftreten von Resonanzen. Der Blindleistungsregler ermittelt die Oberschwingungsspannungen der Messphase(n) und errechnet den Effektivstrom der Kondensatoren. Beim Überschreiten von programmierbaren Grenzwerten wird die Anlage abgeschaltet und beim Unterschreiten wieder zugeschaltet.

## ■ 9.2: Projektierung von Kompensationsanlagen in Netzen mit Oberschwingungen

Die beste Information über das Betriebsverhalten einer geplanten Kompensation erhält man durch die Kombination von zwei Maßnahmen:

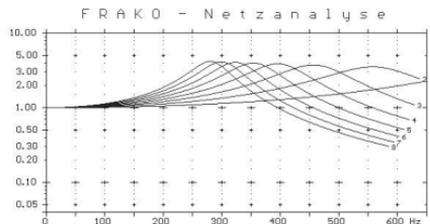
- Messung der Oberschwingungs-Spannungen und -Ströme über mehrere Tage, ohne Kompensation.
- Theoretische Berechnung des Resonanzverhaltens des Netzes.

In dem gemessenen Netz sind dann folgende Oberschwingungspegel zu erwarten:

**Maximalwert der Messung ohne Kompensation, multipliziert mit dem Resonanzfaktor aus der Netzanalyse.**

### Beispiel:

Ein durchschnittliches Niederspannungsnetz mit einem 1000 kVA Trafo. Die Schaltanlage ist über zwei parallel verlegte, 20 m lange Kabel angeschlossen (entspricht der Impedanz von 10 m Kabel). Als Last darf nur rein ohmsche Last berücksichtigt werden, da z. B. Asynchron-Motoren keine Dämpfung auf Oberschwingungen darstellen. Bei voll eingeschalteter Anlage mit 400 kVAr wird die 5. Harmonische (250 Hz) etwa um den Faktor 3 verstärkt. Bei 250 kVAr wird die 7. Oberschwingung ca. um den Faktor 4 verstärkt! Tagsüber, bei höherer Netzdämpfung, sind diese Faktoren geringer, abends und am Wochenende kann der Verstärkungsfaktor der 7. Harmonischen höher sein.



**Bild 42:** Anhebung der Oberschwingungsspannungen in Abhängigkeit von den Kondensatorstufen

### ■ 9.3: Maßnahmen gegen das Auftreten von Resonanzen

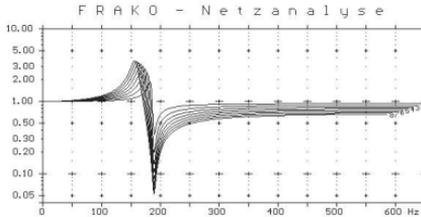
Sind bei der Projektierung einer Kompensationsanlage durch resonanzbedingte Verstärkungen der Harmonischen höhere Spannungspegel als:

4,0 %	der	3. Harmonischen (150 Hz)
5,0 %	der	5. Harmonischen (250 Hz)
4,0 %	der	7. Harmonischen (350 Hz)
3,0 %	der	11. Harmonischen (550 Hz)
2,1 %	der	13. Harmonischen (650 Hz)

zu erwarten, können gravierende Störungen im Niederspannungsnetz auftreten:

- Probleme mit EDV-Anlagen und CNC-Maschinen
- Beschädigung von Stromrichtern bzw. Umrichtern
- unkontrolliertes Auslösen von Leistungschaltern und Sicherungen
- Abschaltungen von unverdrosselten Kompensationsanlagen
- Spannungsanhebungen im Netz
- erhöhte Wirbelstromverluste in Transformatoren und Asynchronmotoren

Wenn der Pegel einzelner Oberschwingungen ohne Kompensation mehr als 1,5% (7. und höhere Harmonische) bzw. 2% (5. Harmonische) beträgt und wenn die Resonanzfrequenz des Netzes in der Nähe dieser Oberschwingungen liegen kann, dann muss damit gerechnet werden, dass diese zulässigen Grenzwerte durch resonanzbedingte Verstärkung überschritten werden. Um die Betriebssicherheit des Niederspannungsnetzes nicht zu gefährden, müssen in solchen Situationen ausschließlich verdrosselte Kompensationsanlagen eingesetzt werden.



**Die Verdrosselung setzt die Resonanzfrequenz auf einen Wert unterhalb 250 Hz herab. Alle Oberschwingungen oberhalb der Resonanzfrequenz der Verdrosselung werden abgeschwächt.**

**Bild 43:** Dämpfung der Oberschwingungsspannungen in Abhängigkeit von den verdrosselten Kondensatorstufen

Ein verdrosselter Kondensator ist eine Reihenschaltung aus Kondensator und Filterkreisdrossel, dessen Reihenresonanzfrequenz durch die Auslegung der Filterkreisdrossel so gewählt wird, dass sie unterhalb der 5. Harmonischen (250 Hz) liegt. Damit wirkt diese Kombination für alle Frequenzen oberhalb der Reihenresonanzfrequenz induktiv, Resonanzen zwischen den Kondensatoren und den reaktiven Netzimpedanzen sind nicht mehr möglich. Eine verdrosselte Anlage saugt einen Teil der Oberschwingungsströme ab. Um eine Überlastung durch die auf dem Netz immer vorhandene 5. Harmonische zu vermeiden, legt man heute die Resonanzfrequenz der Verdrosselung üblicherweise auf 189 Hz und darunter.

Die Verdrosselung wird entweder nach der Resonanzfrequenz Kondensator-Drossel oder nach dem relativen Spannungsabfall „p“ an der Drossel benannt, verglichen mit dem Spannungsabfall am Kondensator. Beide Werte sind nach der folgenden Formel miteinander verknüpft:

$$f_r = f_n \cdot \sqrt{\frac{I}{p}}$$

**Beispiel:** p = 0,07 (7% Verdrosselung) im 50 Hz Netz  
 $f_r = 189 \text{ Hz}$

Die Impedanz des verdrosselten Kondensators ist bei 250Hz um den Faktor x kleiner als die Impedanz des nicht verdrosselten Kondensators.

Für die 5. Oberschwingung hat die verdrosselte Kompensationsanlage:

- Saugkreis -Verhalten bei  $x > 1$
- Sperrkreis -Verhalten bei  $x < 1$

Bei stärkerem Saugkreisverhalten muss der maximal zulässige 250Hz-Anteil begrenzt werden, um die Filterkreisdrossel nicht zu überlasten.

→ p = 5,7 %	fr = 210 Hz	x = 2,4	→ $u_{250,max} = 4\%$
→ p = 7 %	fr = 189 Hz	x = 1,33	→ $u_{250,max} = 5\%$
→ p = 8 %	fr = 177 Hz	x = 1,0	→ $u_{250,max} = 5\%$
→ p = 14 %	fr = 134 Hz	x = 0,42	→ $u_{250,max} = 5\%$

**Beispiel:** Sind der Netzspannung 4 % der 5. Harmonischen überlagert, dann saugt eine verdrosselte Kompensationsanlage die 5. Harmonische folgendermaßen ab:

→ bei 7 %	-Verdrosselung:	mit $4\% \times 5$	$\overset{(-250 \text{ Hz}/50 \text{ Hz})}{\times 1,33} = \mathbf{0,27} \times I_n$
→ bei 5,7 %	-Verdrosselung:	mit $4\% \times 5$	$\overset{(-250 \text{ Hz}/50 \text{ Hz})}{\times 2,40} = \mathbf{0,48} \times I_n$
→ bei 14 %	-Verdrosselung:	mit $4\% \times 5$	$\overset{(-250 \text{ Hz}/50 \text{ Hz})}{\times 0,42} = \mathbf{0,08} \times I_n$

( $I_n$  = 50 Hz-Nennstrom der Anlage)

Grundsätzlich ist bei der Auswahl von verdrosselten Kompensationsanlagen folgendes zu beachten:

- Es dürfen keine verdrosselten und unverdrosselten Kondensatoren am gleichen Niederspannungsnetz parallel betrieben werden.
- Der Parallelbetrieb von Filterkreisanlagen mit unterschiedlichen Verdrosselungsfaktoren (p) ist möglich, die Belastung der Filterkreise ist jedoch unterschiedlich und sollte bei hohen Pegeln genau analysiert werden.
- Handelt es sich um galvanisch getrennte Niederspannungsnetze (Transformatoren, niederspannungsseitig nicht koppelbar), so kann je nach Erfordernis, das eine Netz verdrosselt und das andere unverdrosselt kompensiert werden.
- Die gewählte Ausführung muss den Anforderungen des betreffenden EVU genügen.

#### ■ 9.4: Oberschwingungsgrenzwerte

Für die Beurteilung der Netzqualität kann - je nach Anwendungsart - eine Vielzahl von Normen herangezogen werden. Für normale Niederspannungsnetze, die an öffentlichen Netzen angeschlossen sind, gelten im wesentlichen zwei Normen:

- **EN 50160** "Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen" berücksichtigt Oberschwingungs-Spannungen bis zur 25. Ordnung
- **EN 61000-2-2** "Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Niederspannungsnetzen" berücksichtigt Oberschwingungs-Spannungen bis zur 50. Ordnung

**Tabelle 9:** Oberschwingungsgrenzwerte nach EN 50160 und EN 61000-2-2 im Vergleich

EN 50160		EN 61000-2-2		EN 50160		EN 61000-2-2	
<b>gerade Harmonische:</b>				<b>ungerade Harmonische: (durch 3 teilbar)</b>			
2. (100 Hz)	2,00 %	2,00 %	3. (150 Hz)	5,00 %	5,00 %		
4. (200 Hz)	1,00 %	1,00 %	9. (450 Hz)	1,50 %	1,50 %		
6. (300 Hz)	0,50 %	0,50 %	15. (750 Hz)	0,50 %	0,40 %		
8. (400 Hz)	0,50 %	0,50 %	21. (1050 Hz)	0,50 %	0,30 %		
10. (500 Hz)	0,50 %	2,50 %	27. (1350 Hz)	-	0,20 %		
12. (600 Hz)	0,50 %	2,13 %	33. (1650 Hz)	-	0,20 %		
14. (700 Hz)	0,50 %	1,86 %	39. (1950 Hz)	-	0,20 %		
16. (800 Hz)	0,50 %	1,66 %	45. (2250 Hz)	-	0,20 %		
18. (900 Hz)	0,50 %	1,50 %					
20. (1000 Hz)	0,50 %	1,38 %	<b>ungerade Harmonische: (nicht durch 3 teilbar)</b>				
22. (1100 Hz)	0,50 %	1,27 %	5. (250 Hz)	6,00 %	6,00 %		
24. (1200 Hz)	0,50 %	1,19 %	7. (350 Hz)	5,00 %	5,00 %		
26. (1300 Hz)	-	1,12 %	11. (550 Hz)	3,50 %	3,50 %		
28. (1400 Hz)	-	1,05 %	13. (650 Hz)	3,00 %	3,00 %		
30. (1500 Hz)	-	1,00 %	17. (850 Hz)	2,00 %	2,00 %		
32. (1600 Hz)	-	0,95 %	19. (950 Hz)	1,50 %	1,76 %		
34. (1700 Hz)	-	0,91 %	23. (1150 Hz)	1,50 %	1,41 %		
36. (1800 Hz)	-	0,88 %	25. (1250 Hz)	1,50 %	1,27 %		
38. (1900 Hz)	-	0,84 %	29. (1450 Hz)	-	1,06 %		
40. (2000 Hz)	-	0,81 %	31. (1550 Hz)	-	0,97 %		
42. (2100 Hz)	-	0,79 %	35. (1750 Hz)	-	0,83 %		
44. (2200 Hz)	-	0,76 %	37. (1850 Hz)	-	0,77 %		
46. (2300 Hz)	-	0,74 %	41. (2050 Hz)	-	0,67 %		
48. (2400 Hz)	-	0,72 %	43. (2150 Hz)	-	0,63 %		
50. (2500 Hz)	-	0,70 %	47. (2350 Hz)	-	0,55 %		
Für beide Normen gleich:				49. (2450 Hz)	-	0,52 %	
- Spannungsklirrfaktor <b>THDu: max. 8%</b>							
- Stromklirrfaktor <b>THDi: Empfehlung, max. 20%</b>							

# Kapitel 10: Projektierung in Netzen mit Tonfrequenz-Rundsteueranlagen

## ■ 10.1: Blindleistungs-Kompensation in Netzen mit Tonfrequenz-Rundsteueranlagen

Tonfrequenz-Rundsteueranlagen (TRA) werden in Versorgungsnetzen der EVU installiert, um über angeschlossene Empfänger-Schaltungen, z. B. Tarifwechsel, durchzuführen. Dem Versorgungsnetz werden dazu höherfrequente Steuerspannungen (Tonfrequenzimpulse) überlagert, üblich sind Frequenzen im Bereich von 166 bis 1350 Hz.

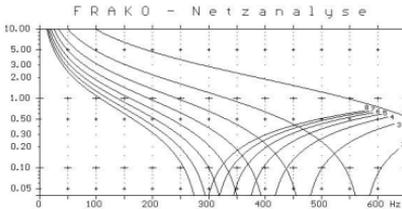
Um die Funktion solcher Rundsteueranlagen nicht zu gefährden, dürfen die Steuerspannungspegel durch die Kundenanlage nicht unzulässig gestört werden. Hierzu wurden von Mitgliedern der VDEW, VSÖ und VSE „**Empfehlungen zur Vermeidung unzulässiger Rückwirkungen auf die Tonfrequenz-Rundsteuerung**“ ausgearbeitet.

Für die Beurteilung von Netzen mit installierten Kompensationsanlagen wird ein Impedanzfaktor  $\alpha^*$  zugrunde gelegt. Die Empfehlung lautet: "Bei einem Impedanzfaktor  $\alpha^* \geq 0,5$  ist nicht mit Störungen von Rundsteueranlagen zu rechnen!"

**Der Impedanzfaktor  $\alpha^*$  ist die auf die Trafoanschlussleistung bezogene Impedanz von Trafo und Kompensation.**

## ■ 10.2: Einfluss von nicht verdrosselten Kompensationsanlagen

Eine unverdrosselte Kompensationsanlage bildet mit den reaktiven Netzimpedanzen einen Schwingkreis. Die Resonanzfrequenz  $\omega_f$  dieses Schwingkreises sinkt mit steigender Kompensationsleistung. In der Nähe der Resonanzfrequenz ist die Impedanz des Schwingkreises sehr niederohmig und kann den Steuerspannungspegel der Tonfrequenz erheblich abschwächen.



Bei voll eingeschalteter Kompensationsanlage wird ein Impedanzfaktor von  $\alpha^* \geq 0,5$  nur noch für eine Rundsteuerfrequenz von 166 Hz erreicht.

**Bild 44:** Impedanzfaktor  $\alpha^*$  in Abhängigkeit von zugeschalteten Kondensatoren

Kann der Impedanzfaktor nicht eingehalten werden, muss eine verdrosselte Ausführung gewählt werden. Die Vorschaltung von Tonfrequenz-Sperrkreisen (TFS) zur Erhöhung der Impedanz, ist in modernen Netzen mit Oberschwingungen nicht mehr zu empfehlen!

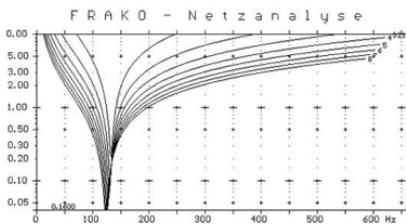
### ■ 10.3: Einfluss von verdrosselten Kompensationsanlagen

Die Verdrosselung von Kompensationsanlagen setzt die Resonanzfrequenz (wie anfangs auf Seite 39 bereits näher beschrieben) auf einen Wert unterhalb 250Hz herab. Alle Oberschwingungen oberhalb der Resonanzfrequenz der Verdrosselung werden nicht mehr verstärkt, sondern abgeschwächt. Für Rundsteuerfrequenzen mit genügendem Abstand zur Resonanzfrequenz der Verdrosselung ergeben sich ausreichende Impedanzfaktoren  $\alpha^*$ .

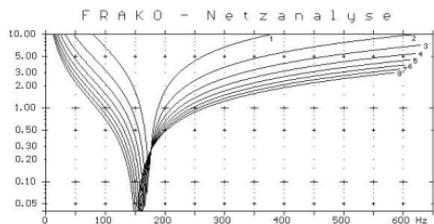
Je nach Ausführung können Rundsteuerfrequenzen beim Einsatz von verdrosselten Kompensationsanlagen auch ohne Tonfrequenz-Sperrkreis sicher gesperrt werden.

Im Hinblick auf höchste Betriebssicherheit von Kompensationsanlagen und die störungsfreie Übertragung von Rundsteuersignalen durch das EVU, empfehlen wir bei einem Kompensationsgrad (Verhältnis Trafo- zu Kompensationsleistung) bis 50 % folgende Ausführungen:

EVU-Rundsteuerfrequenz (in Hz)	Ausführung (Verdrosselungsgrad)	... die wichtigsten Vor-/Nachteile
$\geq 166$	$\rho = 14\%$ (fr = 134 Hz)	besitzt nur Sperrwirkung auf Oberschwingungen, für Netze mit durch 3 teilbaren Oberschwingungen geeignet, allerdings sehr kostenintensiver Aufbau.
$\geq 216,67$	$\rho = 8\%$ (fr = 177 Hz)	mittlere Saugwirkung auf Oberschwingungen, nicht geeignet für Netze mit durch 3 teilbaren OS, relativ kostenintensiver Aufbau.
$\geq 228$	$\rho = 7\%$ (fr = 189 Hz)	kostengünstigster Aufbau, ausreichende Saugwirkung auf Oberschwingungen, nicht geeignet für Netze mit durch 3 teilbaren OS.
$\geq 270$	$\rho = 5,67\%$ (fr = 210 Hz)	oft zu hohe Saugwirkung auf Oberschwingungen, nicht geeignet für Netze mit durch 3 teilbaren OS, ohne Netzanalyse im Vorfeld nicht zu empfehlen.



**Bild 45:** Impedanzfaktor  $\alpha^*$  in Abhängigkeit von den zugeschalteten Kondensatoren, mit 14% verdrosselt



**Bild 46:** Impedanzfaktor  $\alpha^*$  in Abhängigkeit von den zugeschalteten Kondensatoren, mit 8% verdrosselt

Diese Empfehlungen basieren auf mehrjährigen praktischen Erfahrungen und entsprechen den von Mitgliedern der VDEW, VSÖ und VSE ausgearbeiteten „Empfehlungen zur Vermeidung unzulässiger Rückwirkungen auf die Tonfrequenz-Rundsteuerung“ von 1993.

## ■ 10.4: Ausführungen von verdrosselten Kompensationsanlagen

### ■ 12,5 bis 14% Verdrosselung:

Ausführungen mit 12,5 bis 14% verdrosselt, eignen sich auch ohne Tonfrequenz-Sperrkreis für Netze mit Rundsteuerfrequenzen ab 166 Hz. Die Nachteile dieser Ausführung liegen zum einen in höheren Kosten der Drosseln und Kondensatoren, zum anderen in der recht geringen Saugwirkung auf die Industrieüberschwingungen. In Niederspannungsnetzen mit hohem Pegel der 5. Harmonischen sollte (besonders bei Anlagen > 200 kVAr) vom Einsatz dieser Ausführungen abgesehen und dafür eine Ausführung mit 7% oder 8% gewählt werden. Die Ausnahme bilden Niederspannungsnetze mit extrem hohem Pegel der 3. Oberschwingung (150 Hz). Diese Oberschwingungen entstehen in der Regel durch stark unsymmetrisch belastete Niederspannungsnetze oder einer großen Anzahl von einphasigen Oberschwingungserzeugern. Hohe Pegel auf der 3. Oberschwingung findet man deshalb oft bei Bürokomplexen, Banken, Kranken- und Kaufhäusern usw. Um Resonanzen auf dieser Frequenz zu vermeiden, **muß** in solchen Fällen eine Verdrosselung mit Resonanzfrequenz unterhalb 150 Hz eingesetzt werden. Am besten eignet sich hierfür die Ausführung mit 14% verdrosselt, Ausführungen mit 7 oder 8% verdrosselt dürfen in diesen Netzen generell **nicht** eingesetzt werden.

### ■ 7 und 8% Verdrosselung:

Kompensationsanlagen mit 7% verdrosselt haben sich für die meisten Industrieanwendungen bestens bewährt. Die Resonanzfrequenz liegt optimal, um Industrieüberschwingungen (im wesentlichen 5. und 7. Harmonische) abzusaugen, bietet gleichzeitig aber genügend Abstand um nicht überlastet zu werden. Für annähernd symmetrisch belastete Industrienetze mit normalen Oberschwingungspegeln und Rundsteuerfrequenzen oberhalb 228 Hz die ideale Lösung! Die Verdrosselung mit 8% ist eine Variante für Netze mit 216,67 Hz Rundsteuerfrequenz.

### ■ 5 bis 5,67% Verdrosselung:

Diese Ausführungen werden in der Regel wegen der erhöhten Saugwirkung auf Harmonische eingesetzt. Werden jedoch hohe Oberschwingungspegel vom Mittelspannungsnetz eingespeist, sollte (um Überlastungen zu vermeiden) vom Einsatz der 5 bis 5,67% verdrosselten Ausführung abgesehen und dafür eine Ausführung mit  $p = 7\%$  gewählt werden. Bei extremen Pegeln können auch spezielle Filterkreise projektiert werden, siehe "Passive Filtersysteme" auf [Seite 51](#).

### ■ Kombinierte Verdrosselung:

Diese Variante von Kompensationsanlagen wird mit Filterkreisstufen unterschiedlicher Resonanzfrequenzen (in der Regel 12,5/14% und 5/5,67%) aufgebaut. Die Anzahl und Nennleistung der Filterkreisstufen wird so gewählt, dass das Leistungsverhältnis annähernd 1:1, also gleich ist. Kombinierte Verdrosselungen wurden in Netzen mit Rundsteuerfrequenzen im Bereich von 166 bis 190 Hz als einfachere Variante anstelle von verdrosselten Anlagen mit Tonfrequenz-Sperrkreis eingesetzt. Aufgrund regeltechnischer Einschränkungen, unterschiedlicher thermischer Belastung von einzelnen Stufen und akuter Überlastungsgefahr in überschwingungsbehafteten Netzen, ist eine kombinierte Verdrosselung heute nicht mehr empfehlenswert.

### ■ Induktive Kompensationsanlagen:

Bei Netzen mit kapazitivem Leistungsfaktor (z.B. Solarparks, Netze mit überwiegend Schaltnetzteilen usw.) werden Induktivitäten anstatt Kondensatoren benötigt. FRAKO hat auch hierzu geregelte Anlagen entwickelt - mehr im Fachbeitrag "Induktive Kompensation" auf [Seite 59](#).

## ■ 10.5: Überwachung der Kompensationsanlagen im Betrieb

So wichtig wie die Projektierung ist auch die spätere Überwachung und Wartung der Anlagen. Nach der Inbetriebnahme der Kompensation geraten diese häufig in Vergessenheit. An das Verschleißteil Kondensatorschütze erinnert man sich meist erst wieder, wenn unschöne Ausfalleffekte stattgefunden haben. **Schalterschütze unterliegen beim Schalten kapazitiver Lasten hohen Beanspruchungen.** Prellende Schaltkontakte führen zu hohen Umladeströmen in den Kondensatoren und hohem Verschleiß der Schaltkontakte. Rechtzeitiges Wechseln der Schaltschütze verlängert die Lebenserwartung der Kompensationsanlage erheblich. Um **rechtzeitige** Information über den Verschleiß der Schütze zu erhalten, wurde in modernen Blindleistungsreglern von FRAKO eine **Schaltspielzählung** für jede Stufe integriert. Der Blindleistungsregler meldet den optimalen Zeitpunkt für den anstehenden Schützwechsel und spart somit Kosten. Zur vorbeugenden Wartung kann der Betreiber die Anzahl der bisher aufgelaufenen Schaltspiele jeder einzelnen Stufe in der Anzeige abrufen.

Auch durch veränderte Netzverhältnisse können Störungen in der gesamten Niederspannungsanlage entstehen. Ziel einer Netzüberwachung ist es, solche Störungen frühzeitig zu erkennen. FRAKO-Netzüberwachungsgeräte bieten die Möglichkeit vor dem Ausfall von Anlagen oder Anlagenteilen, frühzeitig alarmiert zu werden. Sämtliche sicherheitsrelevanten Messgrößen in Mittel- und Niederspannungsnetzen, Temperaturen empfindlicher Anlagenteile, sowie die verbrauchte Wirk- und Blindarbeit werden erfasst, analysiert, überwacht und gemeldet.

## ■ 10.6: Was, wenn der Oberschwingungsgehalt groß, der Blindleistungsbedarf aber klein ist?

In solchen Fällen gibt es mehrere Lösungen zur Begrenzung von Oberschwingungsströmen, die durch den Einsatz von Oberschwingungserzeugenden Verbrauchern hervorgerufen werden.

Zu den bekannten Maßnahmen gehören vor allem der Einsatz von:

- mehreren aufeinander abgestimmten passiven Filtern (abgestimmte Filterkreise) oder
- Zusammenfassung stark nichtlinearer Lasten und empfindlicher Verbraucher zu getrennten Gruppen und Einspeisung jeder Gruppe über jeweils einen separaten Transformator.

Diese Lösungen bringen jedoch zwei Hauptnachteile mit sich:

- Die Verbesserung des Netzurückwirkungsverhaltens ergibt sich nur für die jeweils konkrete Installation, durch jede Erweiterung kann die Anfangsinvestition verloren gehen.
- Die praktische Umsetzung dieser Lösungen ist in bestehenden Installationen oft sehr schwierig durchzuführen.

Bei Problemen mit:

- zu hohen Pegeln der 3., 9. und 15. Harmonischen und daraus resultierendem hohem Neutralleiterstrom oder
- der Forderung nach abgestimmten Saugkreisen, um den im Mittelspannungsnetz zurückgespeisten Oberschwingungsstrom unter einem vorgegebenen Grenzwert zu halten oder
- bei niedrigem Blindleistungsbedarf und hohen Oberschwingungsströmen, z. B. durch einen großen Anteil von umrichter gesteuerten Asynchronmaschinen

sind Aktive Oberschwingungsfilter oder eine Kombination aus einer Filterkreisanlage mit einem Aktiven Filter von FRAKO oft die optimale Lösung.

# Kapitel 11: Power-Quality Messungen und Analysen

## Anforderungen für die Durchführung und Berichterstellung über Analysen im Rahmen der Spannungsqualität elektrischer Netze und der Betriebsmittelbelastung.

Aus: ZVEI "Empfehlungen für Oberschwingungs- und Leistungsmessungen in elektrischen Netzen"

### ■ 11.1: Einleitung

Deutschland liegt im weltweiten Vergleich der Versorgungszuverlässigkeit mit elektrischem Strom an der Spitze. Eine hohe Versorgungszuverlässigkeit ist aber nicht immer gleichbedeutend mit einer hohen Spannungsqualität, bei der Abweichungen der Netzspannung von der reinen Sinusform bzw. Netzspannungsschwankungen betrachtet werden. Aus diesem Grund ist die Sicherstellung einer ausreichenden Spannungsqualität in industriellen, aber auch zunehmend in öffentlichen Verteilungsnetzen von Bedeutung. Die Anzahl und die Vielfalt der leistungselektronischen Energiewandler hat in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen – vom Schaltnetzteil bis zum leistungsstarken Walzwerkantrieb. Hinzu kommt der Einsatz neuer HGÜ-Leitungen, ob auf dem Festland oder als Verbindung zu Offshorewindparks. Somit ist ein großer Anteil der Erzeugungs- wie auch der Abnahmeleistung leistungselektronisch basiert. Messungen der Spannungsqualität sind somit heute ein Hauptwerkzeug beim Betrieb bzw. der Planung elektrischer Netze. Im Rahmen dieser Empfehlungen sollen Mindestanforderungen an Technische Berichte definiert werden, die sich mit der Messung und Bewertung der Spannungsqualität und der elektrischen Leistung beschäftigen.

### ■ 11.2: Spannungsqualität

Unter dem Begriff Spannungsqualität versteht man in den meisten Fällen die Beeinflussung der Spannung durch:

- Oberschwingungen in der Anschlussspannung bzw. im Strom bis 2,5 kHz
- Schnelle Spannungsänderungen (z. B. Flicker) sowie langsame Spannungsänderungen und Spannungsbandverletzungen
- Kommutierungseinbrüche, teilweise nur erkennbar zusammen mit Kabelresonanzschwingungen
- Zwischenharmonische Spannungen und Ströme bis 2,0 kHz und supraharmonische Spannungen und Ströme (> 2,0 kHz)
- Unsymmetrien in Strom und Spannung
- Tonfrequenz-Signale

### ■ 11.3: Leistungen

Bei der Messung der Leistungen muss man unterscheiden zwischen Anteilen der Netzfrequenz (z. B. 50 Hz in Deutschland) und Anteilen von höheren Harmonischen bzw. durch Unsymmetrien und Modulationen hervorgerufener:

- Wirkleistung, Verschiebungsblindleistung und Verzerrungsblindleistung
- Unsymmetrie-/Modulationsblindleistung
- Blindleistung (enthält alle o. g. Blindleistungsarten und ist immer positiv)
- Grundschiebungsscheinleistung
- Scheinleistung unter Beachtung aller o. g. Leistungsanteile
- Leistungsfaktor  $\lambda$  und Verschiebungsfaktor  $\cos \varphi$

Um eine Bewertung im Zusammenhang mit Aufzeichnungen von Oberschwingungen vornehmen zu können, ist ein Zeitraster von zehn Minuten zu wählen. Moderne Messgeräte gestatten darüber hinaus auch eine Darstellung anderer Zeitintervalle. In vielen Fällen ist es erforderlich, die gemessenen zehn Minuten Mittelwerte zu hinterfragen, ob nicht Vorgänge im elektrischen Netz vorliegen, die eine hohe Dynamik besitzen. Aus diesem Grund sind je nach Qualität des Messgeräts 10 und/oder 200 ms Maximalwerte vorhanden, die in ihrem Einfluss auf die Spannungsqualität bewertet werden müssen.

#### ■ 11.4: Bewertungsgrundlagen

Die Auswertung von Messungen zur Spannungsqualität bzw. der Leistungsverhältnisse erfolgt meistens nach den folgenden Standards oder Richtlinien:

- IEC 61000 für Grenzwerte der Spannungsqualität in öffentlichen und industriellen Netzen in der Mittel- und Niederspannung (nur Spannungen)
- EN 50160 für öffentliche Netze in der Hoch-, Mittel- und Niederspannung (nur Spannungen)
- D-A-CH-CZ Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen (Spannungen und Ströme)
- VDE-Anwenderrichtlinien 41XX für Hoch-, Mittel- und Niederspannung (nur Spannungen)
- IEC 60871 für HS-Kondensatoren
- IEC 60831 für NS-Kondensatoren
- DIN EN 61800 für drehzahlveränderliche Antriebe
- Normen in anderen Regionen der Welt: IEEE 519, GB/T 15543, GOST 13109, Engineering Recommendation G5/4-1 und P28
- Netzanschlussvertrag mit Details zum vereinbarten Verschiebungsfaktor  $\cos \phi$  bzw. weitere Festlegungen

Entsprechend der jeweiligen Norm müssen die Messwerte in Bezug auf die geltenden Grenzwerte zu 100 Prozent oder zu 95 Prozent der Messzeit (Basis meist eine Woche) eingehalten werden.

#### ■ 11.5: Aufgabenstellung

Grundlegend sind nach der messtechnischen Untersuchung eines elektrischen Netzes die folgenden Informationen im Abschlussbericht festzuhalten:

- Genaue Bezeichnung der Firma, des Standorts und der Station
- Anlass der Messung (Routineüberprüfung, Störung, Basis für eine Netzerweiterung oder Auslegung von Anlagen)
- Genauer Messzeitraum
- Übersichtsschaltbild (vereinfacht oder komplex) mit Angabe des Messpunkts und des Schaltzustands
- Lastverhältnisse (Normallast oder abweichende Verhältnisse)
- Exponierter Abnehmer (z. B. Antriebsstromrichter oder Schweißmaschine) mit Daten und eventuell Lastprofil
- Kompensationsanlagen und deren Schaltzustand
- Netzfilter
- Anlagen zur Stromerzeugung und Netzersatzanlagen
- Basis der Bewertung der Messungen (Standards, Richtlinien)
- Wer hat welche Messung durchgeführt
- Name des Verteilnetzbetreibers

## ■ 11.6: Eignung der Messtechnik

Es ist dringend erforderlich, in einem fachlich orientierten Gespräch mit dem Kunden die Randbedingungen für die erforderliche Messung herauszufinden. Somit können Schlussfolgerungen für die dann einzusetzende Messtechnik getroffen werden.

Damit muss zwischen einfachen Messaufgaben mit Messgeräten zur statistischen Erfassung von Werten und Messungen für ingenieurtechnisch anspruchsvolle Netzanalysen mit Geräten, die eine Frequenzauflösung bis 20 bzw. 150 kHz haben und triggerbare Störschriebe aufzeichnen können, unterschieden werden. Dies ist insbesondere bei der neuen Umrichter-Generation und Netzresonanzen durch die Kapazitäten der Betriebsmittel (z. B. unverdrosselte Kompensation, Eingangsfiler, Leistungskabel) erforderlich.

### **Messung der Spannungsqualität**

Bei der Messung der Spannungsqualität sind grundsätzlich Messgeräte der Klasse A nach IEC 61000-4-30 einzusetzen. Damit sind die Messergebnisse normenkonform und können für die Bewertung uneingeschränkt verwendet werden. Bei der Beurteilung des Anschlusspunkts im Rahmen öffentlicher Netze ist weiterhin eine Messung im Zeitraster von zehn Minuten auszuführen. Für die Beurteilung des Lastverhaltens kann das Zeitintervall verkürzt werden oder es sind Oszillogramme z. B. für die Ermittlung von Kommutierungseinbrüchen zu erstellen. Für die Ermittlung der richtigen Flickerwerte ist die jeweilige Netznennspannung in den Messparametern anzugeben.

### **Tonfrequenz-Signale**

Vor der Parametrierung der Messung ist beim Kunden bzw. beim Verteilungsnetzbetreiber das im Netz verwendete Tonfrequenzsignal zu erfragen und entsprechend einzugeben. Die Frequenz und die Signalhöhe sind wichtig für eine festzulegende Maßnahme im Rahmen der notwendigen Reduzierung von Oberschwingungen.

### **Messung von Strömen**

Ströme können mit Zangenstromwandlern oder Rogowski-Spulen gemessen werden. Dabei ist das Wandlerübersetzungsverhältnis und die Phasenlage, bezogen auf die jeweilige Spannung, zu beachten. Wenn das Messgerät über eine Darstellung des Zeigerbilds verfügt, ist dieses zur Vermeidung von Messfehlern zu verwenden. Moderne Messgeräte verfügen auch über Möglichkeiten zur Datennachbearbeitung, wenn fehlerhafte Parametrierungen erkennbar sind.

### **Leistungsmessung**

Bei der Leistungsmessung ist in vielen Fällen eine Messung mit der Zeitauflösung zu wählen, die der Abtastrate der eingesetzten Zähler von 15 Minuten entspricht. Dabei muss angemerkt werden, dass insbesondere in Mittel- und Hochspannungsnetzen auf das Übertragungsverhalten der Spannungswandler zu achten ist. Es ist möglich, dass wandlerabhängig ab 1,0 kHz deutliche Verfälschungen von Messwerten durch interne Resonanzen im induktiven Messwandler auftreten können. Zunehmend sind heute leistungselektronische Geräte im Einsatz, die geradzahlige Harmonische und Zwischenharmonische generieren. Aus diesem Grund sind aus den Messgeräten die entsprechenden Auswertemodi zu beurteilen und gegebenenfalls im Bericht darzustellen. Insgesamt ist es erforderlich, vor oder nach Abschluss der Messungen eine Genauigkeit der Messergebnisse abzuschätzen. Dazu sind die Genauigkeitsklasse, der Wandler sowie die technischen Daten der Messgeräte heranzuziehen. Auch die Lage zum Beispiel von Rogowski-Spulen hat großen Einfluss auf die Genauigkeit und kann Fehler bis zu 20 Prozent verursachen.

## ■ 11.7: Durchführung der Messung

Vor Beginn der Messung sind mit dem Anlagenbetreiber erforderliche Lastvariationen bzw. Schaltzustände festzulegen, die vom Netzbetreiber zu dokumentieren sind, falls diese Information nicht aus den Messergebnissen eindeutig ersichtlich ist.

Aus diesen Maßnahmen ist auch die Dauer der Messungen ableitbar, die im Normalfall alle Belastungszustände abdecken sollte. Nur dann sind für die Betriebsführung eines Netzes entsprechende Maßnahmen ableitbar – etwa wenn Grenzwerte von Normen erreicht oder überschritten werden.

Bei Messungen von zufälligen Störereignissen sind eventuell Trigger auf Schaltvorgänge oder Laständerungen erforderlich.

Bei längeren, nicht beaufsichtigten Messungen ist darauf zu achten, nur zertifizierte Geräte, Messleitungen und Adapterstücke zu benutzen, um eine Personengefährdung zu vermeiden.

## ■ 11.8: Berichtsform und Empfehlungen

Es gibt zwei Möglichkeiten der Erstellung von technischen Berichten zur Darstellung der Messergebnisse:

- Kurzbericht mit ausgewählten Messergebnissen
- Umfassender Bericht mit einem Theorieteil (Erklärung auftretender Spannungsphänomene wie Flicker, Oberschwingungen, Spannungseinbrüche), einem beschreibenden Textteil und verschiedenen Anlagen für die jeweiligen Messpunkte

In beiden Fällen sollte darauf geachtet werden, dass eine Bewertung der Messungen in Hinblick auf Einhaltung oder Überschreitung der Grenzwerte von Normen oder Vorgaben des Netzbetreibers erfolgt. Somit wird dem Auftraggeber der Netzanalyse, der vielfach kein ausgewiesener Experte für das Thema Spannungsqualität ist, die Möglichkeit gegeben, die durchgeführten Messungen zu bewerten und Schlussfolgerungen für den Betrieb seines elektrischen Netzes zu ziehen.

Es ist grundsätzlich erforderlich, dass bei Überschreitung von Grenzwerten zum Beispiel der Oberschwingungen, des Flickers (schnelle Spannungsschwankungen) und der Blindleistung im Bericht Empfehlungen für netz- und abnehmerseitige Abhilfemaßnahmen angegeben werden:

- Erhöhung der Kurzschlussleistung durch Veränderung der Transformatorleistung bzw. Erhöhung der Netzanschlusskapazität
- Veränderung der Pulsigkeit von Stromrichteranlagen
- Veränderung der netzseitigen Schaltung von Diode auf Active Front-End
- Kapazitive Kompensationsanlagen mit Schutzsteuerung oder NS-Halbleiter-Schaltern bei hoher Lastdynamik, teilweise jedoch auch induktive Anlagen
- Passive Filterkreise (kapazitive Blindleistung beachten)
- Aktive Leistungsfilter
- Dynamische Filtersysteme, die induktive und kapazitive Blindleistung erzeugen können

Es ist weiterhin erforderlich, auf zukünftige Netzänderungen im Kundennetz einzugehen (Erhöhung der Leistung, vermehrter Anschluss von Umrichtern etc.). Bei den Empfehlungen sollten jedoch nur die Wirksamkeit der jeweiligen netz- oder abnehmerseitigen Maßnahmen sowie wirtschaftliche Aspekte wie zum Beispiel die Verlustleistung objektiv beschrieben werden. Dabei ist auf eine Herstellerunabhängigkeit zu achten.

## ■ 11.9: Checkliste Messbericht

- 
- Bezeichnung der Firma, des Standorts, der elektrischen Station und des Messpunkts

---

  - Anlass der Messung
    - Betriebsmessung/Routineüberprüfung
    - Störungsanalyse/Fehlersuche
    - Datenerfassung zur Auslegung von Neuanlagen/Erweiterung

---

  - Messzeitraum

---

  - Angaben zum verwendeten Messgerät

---

  - Angaben der verwendeten Normen, Richtlinien und eventuell Vorgaben des Netzbetreibers

---

  - Übersichtsschaltbild mit Angabe des Messpunkts und der Schaltzustände (Schalter offen/geschlossen)

---

  - Lastangaben
    - nicht lineare Abnehmer (mit aktiven Bauelementen und nicht sinusförmiger Stromaufnahme, z. B. alle Arten von Stromrichtern und Netzteilen)
    - lineare Abnehmer (mit passiven Bauelementen und sinusförmiger Stromaufnahme)
    - Eigenerzeugung (Notstrom-Generatoren, BHKW, PV-Anlagen)
    - Kompensationsanlagen/Filter (aktiv/passiv)

---

  - Belastungszustände (mit Zeitangabe)
    - Schichtbetrieb
    - Wartungsschichten
    - vom Normalzustand abweichende Lastzustände

---

  - Bericht enthält die Darstellung der Ergebnisse und deren Bewertung

---

  - Schlussfolgerung und gegebenenfalls Empfehlungen für Maßnahmen
- 

### ■ Die FRAKO hilft Ihnen gerne!

Wir kommen gerne zu Ihnen und hören uns Ihre Sorgen und Probleme zu Themen wie Power-Quality, Betriebssicherheit, Störungen im Betriebsablauf, Energieeffizienz, Energie-Management-Themen und Energie Kostenreduzierung an. Gemeinsam mit Ihnen finden unsere Techniker und Ingenieure mit Sicherheit eine Lösung für Ihr Problem.

Wir bieten komplette Netzmessungen und Analysen an - oder verleihen für diesen Zweck Netzanalysegeräte aus unserem Gerätepool. Nach Rückgabe des Messgerätes an uns erfolgt eine detaillierte schriftliche Auswertung - inklusive Lösungsvorschläge durch unsere Spezialisten.

Auf unserer Homepage erfahren Sie mehr und können ggf. auch gleich ein Analysegerät reservieren: [www.frako.com/service/beratung/](http://www.frako.com/service/beratung/)

# Kapitel 12: Oberschwingungs-Filterssysteme

## ■ 12.1: Passive Filtersysteme

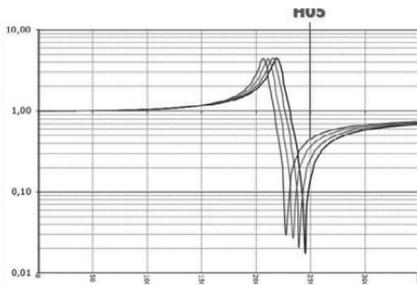
Passive Filter - auch Saugkreise oder abgestimmte Filter genannt - werden direkt auf einzelne Oberschwingungen abgestimmt und nicht primär dafür eingesetzt, um Blindstrom zu kompensieren, sondern um Oberschwingungen vom Netz abzusaugen. Da in modernen Industrienetzen nur noch wenig kapazitive Blindleistung benötigt wird, stellt sich die Herausforderung, möglichst viel an Oberschwingungen bei möglichst kleiner Blindleistung zu filtern. Passive Filter von FRAKO haben eine Filterleistung etwa 300 A bei lediglich 100 kVAr Blindstrom und bieten daher ein hervorragendes Kosten/Nutzen-Verhältnis!

Die extreme Saugwirkung birgt bei veränderten Netzbedingungen ein hohes Überlastungsrisiko. Um die für das Netz optimale Saugwirkung zu erzielen und das Überlastungsrisiko zu beherrschen, besitzen innovative Filtersysteme eine automatische Einrichtung zur Verstimmung der einzelnen Laststufen. Damit kann die Saugwirkung verstärkt oder abgeschwächt werden - das System stellt immer den optimalen Verdrosselungsgrad ein.

Ein Passives Filtersystem mit automatischer Verstimmung besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- Lastkreis mit mehreren **Filterstufen**-Modulen (Leistungs-Kondensatoren, Drossel, Schaltgerät, Absicherung)
- Bis zu 3 **Verstimmungsstufen** je Filterstufe (Verstimmungs-Kondensatoren, Schaltgeräte, Absicherung)
- Eine übergeordnete **Steuerung** (Netzanalysegerät mit Steuerfunktionalität)

Die übergeordnete Steuerung analysiert und speichert Daten von Netzqualität und Auslastung der Filterstufen. In Abhängigkeit der analysierten Daten werden die Filter- und Verstimmungsstufen geregelt. Als Regelparameter sind Oberschwingungsgehalt und Netzbelastung üblich.



**Bild 48:** Impedanzverlauf von vier steuerbaren Verdrosselungsgraden



**Bild 47:** Passives Filtersystem mit bis zu 400A Nennstrom

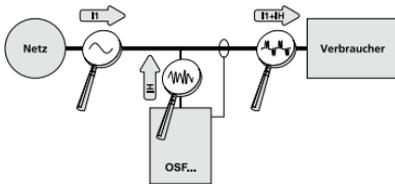
Falls die Blindleistung des Systems zu unerwünschten, kapazitiven Leistungsfaktoren führt - oder das Netz bereits kapazitiv ist, müssen Aktive Filtersysteme eingesetzt werden, siehe Kapitel "Aktive Filtersysteme" auf [Seite 52](#).

## ■ 12.2: Aktive Filtersysteme

Der entscheidende Vorteil eines Aktiven Filters liegt darin, dass Oberschwingungen kompensiert werden, ohne den Leistungsfaktor bei 50 Hz ungewollt zu beeinflussen. Außerdem bleibt die Kompensationswirkung auch bei späteren Erweiterungen einer Installation wirksam. Aufgrund des modularen Aufbaus der Aktiven Filter von FRAKO kann die Nenngröße einfach vom aktuellen Bedarf gewählt werden. Zusätzlicher Bedarf kann jederzeit durch Hinzufügen weiterer Filtermodule aufgefangen werden - d.h. die Anfangsinvestition geht nie verloren!

### Funktionsprinzip von Aktiven Oberschwingungsfiltern

Das parallel zu den Oberschwingungserzeugern angeschlossene Aktive Filter analysiert den von nichtlinearen

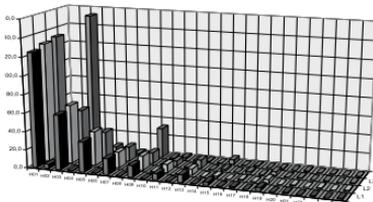


Verbrauchern erzeugten Oberschwingungsstrom und liefert den gegenphasigen Kompensationsstrom, entweder das gesamte Spektrum der 2. bis 50. Harmonischen oder aber gezielt ausgewählte Harmonische. Dadurch werden die entsprechenden Oberschwingungsströme am Anschlusspunkt im Rahmen der Auslegung vollständig neutralisiert.

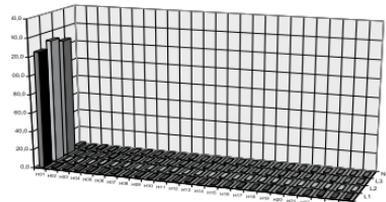
**Bild 49:** Funktionsprinzip eines Aktiven Filters  
I: Grundschwingungsstrom  
IH: Oberschwingungsstrom

Die Kombination Oberschwingungsfiler und -Verbraucher wird vom Netz als eine insgesamt lineare Last angesehen, die einen sinusförmigen Strom verbraucht.

Die Installation ist denkbar einfach. Es muss lediglich eine dreiphasige Einspeisung mit oder ohne Neutralleiter vorhanden sein und die Stromwandler auf der Zuleitung der nichtlinearen Verbraucher installiert werden.



**Bild 50:** Oberschwingungsmessung ohne Filter



**Bild 51:** Oberschwingungsmessung mit Filter

Typische Anwendungsfälle sind:

- Niederspannungsnetze mit vielen Umrichtern, bei denen die Auflage besteht, nur begrenzt Oberschwingungsströme ins überlagerte Netz zurück zu speisen, z.B. bei langen Sticleitungen zu abgelegenen Anlagen mit entsprechend niedriger Kurzschlussleistung.
- Moderne Umrichternetze mit hohem OS-Beitrag, aber geringen Blindleistungsbedarf.
- Niederspannungsnetze mit einem hohen Anteil der 3. Harmonischen durch den Einsatz von einphasigen Oberschwingungserzeugern - siehe Problematik im N-Leiter, erklärt auf [Seite 33](#).

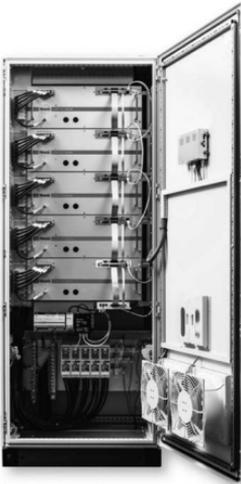
Aktive Filter von FRAKO besitzen neben der Oberschwingungskompensation auch Funktionalitäten, wie **Dynamische Blindstromkompensation** und **Lastsymmetrierung**.

Spezielle spannungsgeführte Systeme regeln hochdynamisch bis zur 100. Harmonischen über die Netzimpedanz, siehe Fachbeitrag "Aktive Filter" ab [Seite 57](#).

# Kapitel 13: Fachbeiträge

## ■ 13.1: Fachbeitrag Aktive Filter (stromgeführt) „Aktivitäten gegen Oberschwingungen“

Bisher gibt es kaum Mittel, um die Oberschwingungen in Energie-Netzen mit vertretbarem Aufwand zu minimieren. Meist wird versucht, sie bereits am erzeugenden Gerät durch passive Elemente zu beseitigen oder abzuschwächen. Für jede Oberschwingung muss dazu jedoch ein abgestimmter Saugkreis aus Induktivitäten und Kapazitäten eingesetzt werden, um die unerwünschten Auswirkungen zu reduzieren. Mit Hilfe eines aktiven Oberschwingungsfilters lässt sich das Problem komfortabel lösen.



*Aktives Oberschwingungsfilter  
im modularen Schranksystem*

Alle ganzzahligen Vielfachen einer Grundschwingung werden als Oberschwingung oder Harmonische bezeichnet. Meist wird der betreffenden Oberschwingung noch die entsprechende Ordnungszahl „n“ vorangestellt. Ausgehend von der Frequenz der Netzspannung von 50 Hz hat damit die fünfte Harmonische eine Frequenz von 250 Hz. Grundlage dieser Darstellung ist die mathematische Tatsache, dass jede beliebige sich kontinuierlich wiederholende Schwingungsform in viele ganzzahlige reine Sinusschwingungen zerlegt werden kann. Die Oberschwingungen entstehen beim Betrieb von Verbrauchern mit nicht sinusförmiger Stromaufnahme. Die Kurvenform der Stromaufnahme dieser Verbraucher ist bestimmend für Anzahl und Amplitude der Oberschwingungen. Je größer die Abweichung vom Sinus, desto mehr Oberschwingungen werden vom Verbraucher ins Netz zurückgespeist und desto höher ist die Amplitude der einzelnen Oberschwingungen. Die Zerlegung einer Kurvenform erfolgt durch die sogenannte Fourier-Analyse, bei der jeder Oberschwingung die entsprechende Ordnungszahl und Amplitude zugeordnet wird.

Eine einfache Methode zur Bestimmung einzelner Oberschwingungen ist das Messen mit dem Zangenamperemeter, das einzelne Oberschwingungen aus dem gemessenen Signal herausfiltern und darstellen kann.

Auf diese Weise kann zwar immer nur eine Harmonische dargestellt werden, es lässt sich jedoch relativ schnell und einfach ein grober Überblick über die Amplituden der einzelnen Oberschwingungen gewinnen. Es gibt eine Reihe von Effekten, die auf die Anwesenheit von Oberschwingungen hindeuten: PC steigen aus, Festplattenfehler treten auf, Bildschirme flimmern, der N-Leiter überhitzt, an Kompensationsanlagen treten Schäden auf oder in anderen Anlagenteilen wird Korrosion bemerkt.

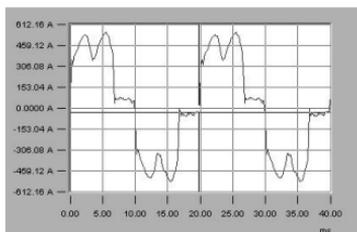
## ■ Funktionsprinzip eines Aktiven Oberschwingungs-Filters

Grundgedanke beim Einsatz eines Aktiven Oberschwingungs-Filters ist die aktive Kompensation. Dabei werden keine Ströme abgesaugt, sondern je nach Bedarf zusätzliche Ströme eingespeist. Zuerst misst ein Wandler den momentan aufgenommenen Strom des Verbrauchers. Dann analysiert die Steuereinheit des Filters diesen Strom in Bezug auf Amplitude und Harmonische und speist anschließend einen Strom in das Versorgungssystem ein, der in Amplitude und Ordnungszahl der einzelnen Harmonischen exakt dem Strom des Verbrauchers entspricht. Die Phasenlage des Einspeisestroms ist jedoch um  $180^\circ$  gegenüber dem Verbraucherstrom verschoben. Somit heben sich die harmonischen Ströme gegenseitig auf, das

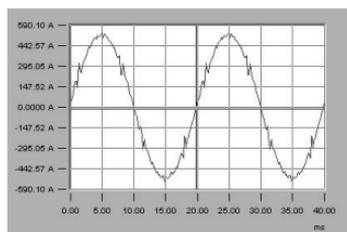
speisende Netz muss nur die Grundschwingung liefern und wird nicht mit Harmonischen belastet. Ein großer Vorteil des Aktiven Filters gegenüber herkömmlicher Technik besteht in der flexiblen Anpassung der Kompensationsleistung. Je nach Bedarf kann das Filter mehr oder weniger Kompensationsstrom liefern.

Selbst bei Überlastung schaltet das Filter nicht ab, sondern geht in die Strombegrenzung, d. h. das Filter liefert seinen maximalen Strom und kompensiert so einen Großteil der Oberschwingungen. Wechselwirkungen mit anderen Systemkomponenten wie verdrosselten Blindleistungskompensationen oder USV-Anlagen sind dadurch auf ein unkritisches Minimum reduziert. Eine Erweiterung oder Kombination mehrerer Filter ist problemlos möglich. Ändern sich die Betriebs- oder Netzbedingungen, passt sich das Filter im Rahmen seiner Nennbetriebsdaten automatisch an.

## ■ Die Bedeutung der Anlageninstallation



*Kurvenform des Stroms ohne Filter*



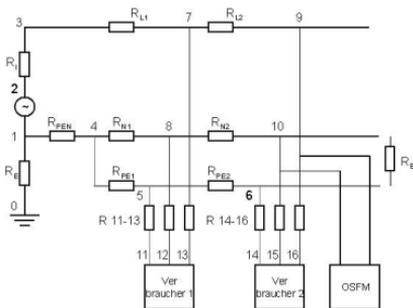
*Kurvenform des Stroms mit Filter*

Von elementarer Wichtigkeit für die Funktion einer Oberschwingungskompensation ist eine fachgerecht ausgeführte Elektroinstallation. Sowohl die Art des Netzes als auch die Ausführung kann nicht nur die Wirksamkeit des Filters beeinträchtigen, sondern auch Störungen in der Energieversorgung begünstigen, ja sogar hervorrufen. Jede elektrische Anlage hat ihren Ursprung in der Erdung. Eine funktionfähige und konsequent angewandte Erdung ist die Grundlage jeder Energieversorgungsanlage. Steck in der Erdungsanlage der „Wurm“, finden Spannungsverschleppungen, elektromagnetische Störfelder und nicht zuletzt auch Oberschwingungen ideale Voraussetzungen, um sich ungehindert auszubreiten. Die Hauptaufgabe der Erdung besteht in der Gewährleistung, dass im Fehlerfall keine gefährliche Berührungsspannung entsteht, und dass der Strom ungehindert gegen Erde abfließen kann. Nur dann ist sichergestellt, dass ein vorgeschaltetes Überstromschutzorgan innerhalb der vorgegebenen Zeit abschaltet. Weiter soll die Erdungsanlage verschiedene Betriebsmittel auf einem einheitlichen, möglichst niedrigen Niveau halten und eventuell vorhandene Potenzialunterschiede ausgleichen.

## ■ Strikte Trennung von N und PE

Wird diese Funktion gestört, z. B. weil Betriebsströme auf dem PE-Leiter fließen, bilden sich elektromagnetische Felder um die Schutz- und Potenzialausgleichsleiter, was zu erheblichen Beeinträchtigungen führen kann. Da sich solche Felder dann beispielsweise auch in der Abschirmung von Datenleitungen bilden, können Störungen zu Datenverlusten führen. Die Verbindung des PE-Leiters mit anderen leitfähigen Systemen wie Wasser-, Gas- oder Heizungsanlagen bringt zusätzliche Betriebsströme auf diese Anlagenteile. Die Folgen sind Potenzialverschleppungen und Korrosion.

Deshalb ist es die wesentliche Forderung an ein modernes Stromversorgungssystem, so früh wie möglich auf eine Trennung zwischen N- und PE-Leiter zu achten und auf die konsequente Einhaltung dieser einmal



Prinzipielle Darstellung eines simulierten Einphasensystems

und PE nicht zwingend vor. Es gibt lediglich Empfehlungen, vor allem aus der EDV und Telekommunikations-Branche sowie dem Verband der Sachversicherer, zur konsequenten Verdrahtung in 5-Leiter-Technik. Filterströme sind auf dem PE-Leiter natürlich nicht zu vermeiden, sofern jedoch keine Betriebsströme oder Oberschwingungen hinzukommen, sind sie zu tolerieren. Durch die EMV-Richtlinien ist heute sowohl der Anlagen- als auch der Geräte- Konstrukteur in einer technischen Zwickmühle. Einerseits sollen die Geräte und Anlagen möglichst wenig Störungen in das Netz einspeisen, andererseits müssen sie störungsfrei arbeiten und die erzeugten Störströme sollen abgeleitet werden. Meist geschieht diese Ableitung über Filterkondensatoren direkt gegen den Schutzleiter. Bei fest angeschlossenen Anlagen kann eventuell auch gegen den Neutraleiter abgeleitet werden, bei steckbaren Verbrauchern mit Schukosteckern geht dies nicht, da der Stecker um 180° gedreht werden kann.

### ■ Ein Beispiel

Ein herkömmlicher PC mit einem 250 W-Netzteil hat einen Ableitstrom von etwa 1 mA. Dieser besteht aus der 50 Hz- Grundschiwingung und diversen Oberschwingungen. Die Ableitströme bewirken eine Verunreinigung auf dem PE-Leiter, sind jedoch im allgemeinen unkritisch für die Betriebssicherheit einer Anlage. 100 PC haben entsprechend etwa 0,1 A Ableitstrom. Geht man von einem PE-Widerstand von etwa 1  $\Omega$  aus, ergibt sich gerade ein Spannungsabfall von 0,1 V. Meist ist das gesamte Schutzleitersystem niederohmig. (Eine Leitung mit 10 mm<sup>2</sup> Querschnitt hat pro Meter einen Widerstand von 0,0012  $\Omega$  oder  $1,2 \times 10^{-3} \Omega$ ). In einem System mit einem Verbrauchernennstrom von 100 A kann dagegen durchaus ein Oberschwingungsstrom der dritten Harmonischen von 40 A fließen, aus dem dann ein Spannungsfall von immerhin 40 V resultiert.

Hier liegt der klassische Anwendungsfall für ein Aktives Filter vor. Die Kompensation von Verbrauchern, die große Oberschwingungsströme erzeugen, entlastet das Leitungssystem von Oberschwingungen und schützt andere Verbraucher vor den Auswirkungen der Harmonischen. Funktionieren kann dies jedoch nur, wenn eine strikte Trennung von N- und PE-Leiter gewährleistet ist. In der Praxis hat sich gezeigt, dass durch den Einsatz von Aktiven Filtern eine Reduktion der Oberschwingungen von mehr als 30% auf etwa 5% möglich ist. Und dies bei Verbrauchern, die stark verformte Stromaufnahmekurven haben und die zudem noch mit Stromspitzen behaftet sind.

Eine Simulation der unterschiedlichen Netzverhältnisse kann die Auswirkungen auf den Gehalt der Oberschwingungen verdeutlichen. Für die Darstellung genügt der Einfachheit halber ein einphasiges Netz mit N- und PE-Leiter. Das System wird mit zwei Verbrauchern belastet, wobei der Erste Oberschwingungen in

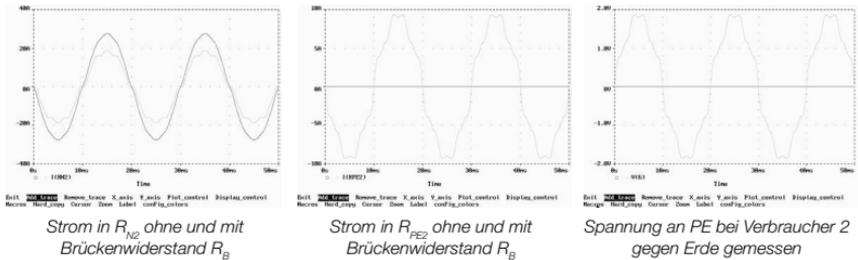
begonnenen isolierten Verlegung dieser beiden Leitungen zu achten.

In einem konkreten Fall wurden durch Oberschwingungen Telefone gestört und Bildschirme zum Flimmern gebracht. Die Messung der Oberschwingungen ergab einen starken Anteil der 3. Harmonischen von bis zu 35% des Nennstroms; allerdings nicht nur auf dem N-, sondern vor allem auch auf dem PE-Leiter.

Bevor in einem solchen Fall Maßnahmen gegen die Harmonischen ergriffen werden können, muss eine Optimierung des Leitungssystems nach den genannten Kriterien erfolgen. Leider schreibt das derzeit (2001) gültige Regelwerk die Trennung von N

das Versorgungssystem zurückspeist, der Zweite jedoch keine Oberschwingungen verursacht oder diese durch ein Aktives Filter kompensiert sind. Im Idealfall besteht die Belastung der PE-Leiter nur aus den Filterströmen der Verbraucher, die z. B. von Schaltnetzteilen oder Netzeingangsfiltren verursacht werden.

Natürlich werden auch Oberschwingungen über diese Filter auf den PE abgeleitet. Um die Simulation möglichst praxisnah durchzuführen, wurden die jeweiligen Amplituden und Ordnungszahlen der Oberschwingungen aus einer Netzanalyse übernommen.



Die Kurvenform des Stroms entspricht nahezu den tatsächlich vorhandenen Gegebenheiten eines belasteten Stromversorgungssystems. Der Filter-Ableitstrom liegt trotz der Oberschwingungsbelastung im mA-Bereich und beeinträchtigt deshalb die Funktion des PE-Leiters nur wenig. Wird nun die Trennung von N und PE aufgehoben, weil z. B. in einem Unterverteiler eine Brücke zwischen N- und PE-Schiene eingefügt wird, dann fließen auf dem PE Betriebsströme. Weil N und PE parallel geschaltet sind, teilen sich die Ströme gemäß den Widerstandsverhältnissen umgekehrt proportional auf.

Durch die Verbindung zwischen N und PE werden sich auch auf Abschirmungen, Armierungen, Wasser-, Heizungs- und Gasleitungen Spannungspotenziale und dadurch elektromagnetische Felder aufbauen. Alle metallischen Gebäudeteile können so zu Störquellen werden. Der Schutzleiter wird nun durch Betriebsströme belastet und auf ein Potenzial gegenüber Erde angehoben. Je nach Strom und Widerstand können Spannungen bis in den 100 V Bereich auftreten. Durch die Belastung des Schutzleiters mit Oberschwingungsströmen kann die Stromstärke beachtlich über den eigentlichen Nennstrom eines Verbrauchers ansteigen. Neben Betriebsstörungen kommt es auch zu unzulässig hoher Erwärmung der PE/N-Leitungen. Im schlimmsten Fall sogar zum Abbrennen dieser Leitungen. Logischerweise folgt die Spannung am PE dem Stromverlauf, so dass sich eine Spannung des PE gegen Erde aufbauen kann. Der PE führt dann kein Erdpotential mehr, er kann seine Aufgabe nicht mehr erfüllen.

## ■ Das Resümee

Eine wirksame Maßnahme zur Reduzierung von Oberschwingungen und deren Folgen auf der Stromversorgung ist der Einsatz Aktiver Oberschwingungsfiltren. Genau so wichtig ist jedoch auch eine einwandfreie, übersichtlich ausgeführte Elektroinstallation. In der Praxis ist eine Messung der Ströme auf dem Schutzleiter deshalb unerlässlich. Durch diese Messung können unzulässige Ströme sofort festgestellt werden. Aufwendiger ist dagegen die Lokalisierung der überzähligen Verbindungspunkte von N und PE. Hierfür sind genaue Kenntnisse über Leitungsführung und Gebäudekonstellation erforderlich. Nur durch die Einhaltung der genannten Maßnahmen kann eine gezielte „Säuberung“ des Versorgungssystems erreicht und die Spannungsqualität verbessert werden.

### ■ 13.2: Fachbeitrag Aktive Filter (spannungsgeführt) „Spannungsgeführte Aktivfilter bei Notstrombetrieb“

Heute sind fast alle am Stromnetz angeschlossenen Geräte nichtlineare Verbraucher. Ihre nichtsinusförmige Stromaufnahme verzerrt die Netzspannung und erzeugt damit Oberschwingungen. Die Folge sind Überbelastungen der angeschlossenen Geräte und Anlagen, die zu Störungen in der Infrastruktur von Unternehmen bis hin zur Gefährdung der Betriebssicherheit führen. Abhilfe schaffen passive oder aktive Filtersysteme.

Schwierig wird es in kritischen Infrastrukturen, bei denen die Netzstabilität nicht nur im Netzbetrieb, sondern auch im Notstrombetrieb sicherzustellen ist. Kritische Infrastrukturen sind von exponierter gesellschaftlicher Relevanz, die einem besonderen Schutz unterliegen. Dazu gehören u.a. die Informations- und Kommunikationstechnologie, die Energie- und Wasserversorgung, die Gesundheitsversorgung sowie das Rettungs- und Finanzwesen, um nur einige zu nennen.



*"Highspeed Aktivfilter"  
im Schranksystem*

Bei einer öffentlich-rechtlichen Sendeanstalt wurden im Zuge der Umstellung von DVB-T auf DVB-T2 HD neue Sendeanlagen installiert. Der neue Fernsehübertragungsstandard verspricht mehr Programme in weit höherer Bildqualität. Da der öffentlich-rechtliche Rundfunk zu den kritischen Infrastrukturen zählt, müssen die Sendeanlagen stets und unterbrechungsfrei sendebereit sein. Neben dem regulären Netzbetrieb muss daher auch der Generatorbetrieb mit einem Notstromgenerator funktionieren. FRAKO wurde beauftragt, Power-Quality-Messungen im Netz- und im Inselbetrieb zu analysieren, um mögliche Probleme in Bezug auf Oberschwingungsbelastungen und Resonanzlagen zu erkennen. Das Resultat: Die neue Sendeanlage ist mit 150 kW Summenleistung kein besonders leistungsstarker Verbraucher, der Leistungsfaktor  $\cos \phi$  ist besser als 0,95 (induktiv) und damit besteht kein Blindleistungskompensationsbedarf. Sämtliche Oberschwingungsspannungen bis zur 50. Harmonischen wie auch die geometrische Summe THDu lagen bei Netzbetrieb noch innerhalb der zugrunde gelegten Norm DIN EN 61000-2-4, Klasse 2. Allerdings wurden im Generatorbetrieb hohe

Oberschwingungspegel oberhalb der 25. Harmonischen, also oberhalb von 1 kHz festgestellt, die sich aus Resonanzstellen im Bereich der 29. Harmonischen ergaben. Bei den Messungen wurde ein sprunghafter Anstieg von Oberschwingungen höherer Ordnungen festgestellt.

### ■ Netzprobleme mit Oberschwingungen bei Generatorbetrieb

Ursache der Resonanzstellen sind die nicht verdrosselten Kapazitäten der Sendeanlagen, die dafür sorgen, dass das Netz bei etwa 1.450 Hz schwingt. Sie sollten daher mit einem Filter kompensiert werden. Jedoch verschiebt sich die Resonanzfrequenz ständig und hängt von der Kurzschlussleistung des Gesamtsystems ab. Im Netzbetrieb ist die Kurzschlussleistung hoch, die Resonanzfrequenz liegt oberhalb 3 kHz. Im Generatorbetrieb hingegen ist die Kurzschlussleistung wesentlich kleiner, die Resonanzfrequenz sinkt und liegt bei nur 1,5 kHz.

Bei der Auswahl des Filtersystems musste ein störungsfreier Betrieb sowohl im Netz- als auch im Generatorbetrieb im Vordergrund stehen. Außerdem durften die in der Regel hörbaren Oberschwingungen von der Sendeanlage nicht übertragen werden.

### ■ Nur spannungsgeführte Aktivfilter sind geeignet

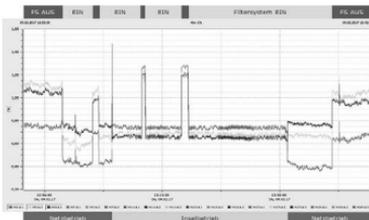
Passive Filtersysteme wirken oberhalb deren Abstimmfrequenz induktiv, bilden einen geringen Widerstand gegenüber Oberschwingungen und saugen diese gezielt und effektiv ab. Der Nachteil: Sie sind nur für einen bestimmten Frequenzbereich ausgelegt und liefern eine zusätzliche Grundschwingungsblindleistung, welche in diesem Fall zu einem kapazitiven Leistungsfaktor geführt hätte. Nicht nur deshalb waren sie für diese Anwendung ungeeignet, sondern auch, weil sich das Oberschwingungsspektrum im Generatorbetrieb stark ändert.

Aktive Filtersysteme erzeugen zur Kompensation von Oberschwingungen einen gegenphasigen Strom. Dabei können sie sich den zu kompensierenden Frequenzen automatisch anpassen. Man unterscheidet strom- und spannungsgeführte, aktive Filter. Stromgeführte Filter messen den Laststrom und errechnen über Fourier-Analysen den gegenphasigen Kompensationsstrom. Sie können Oberschwingungen verschiedener Ordnung gleichzeitig und die Blindleistung dynamisch kompensieren. Spannungsgeführte Filter können impedanzgeführt arbeiten, d.h. sie kompensieren nicht nur Oberschwingungen, sondern können auch Resonanzen aktiv unterdrücken. Da keine Stromwandler notwendig sind, arbeiten diese Systeme wesentlich schneller als stromgeführte Filter. Für den Anwendungsfall der Sendeanstalt war ein spannungsgeführtes Aktivfilter optimal. Im Falle eines stromgeführten Aktivfilters hingegen könnte es zu einer Instabilität zwischen der Stromregelung des Filters und der Regelung des Generators im Notstrombetrieb kommen.

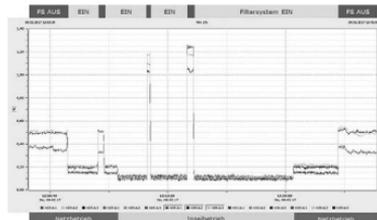
### ■ Die Lösung: Highspeed Aktivfilter

Die Sendeanstalt erhielt ein spannungsgeführtes Aktivfilter von FRAKO. Das 3-Leiter-Gerät mit einer Nennleistung von 70 kVA kann Oberschwingungen bis zur 100. Harmonischen kompensieren, d.h. bis zu 5 kHz. Dabei werden entweder das gesamte Spektrum oder gezielt ausgewählte Harmonische kompensiert. Außerdem werden Resonanzen erheblich bedämpft. Mit einer Reaktionszeit unter 20  $\mu$ s eignet sich das Filter speziell für schnelle und große Lastwechsel. Das Filtersystem arbeitet ohne Stromwandler, was in diesem Fall der elektrischen Installation entgegenkam.

Das spannungsgeführte Filtersystem erfüllt die gewünschten Anforderungen in den beiden Betriebsarten Netz- und Generatorbetrieb und entlastet nun das Versorgungsnetz wesentlich. Sämtliche Oberschwingungspegel der zuvor kritischen höheren Harmonischen wurden deutlich reduziert, das war besonders beim Inselbetrieb an den wesentlich geringeren Generatorgeräuschen hörbar. Zusätzlich konnten in beiden Betriebszuständen die typischen Umrichter-Oberschwingungen der 5. und 7. Harmonischen auf unkritische Pegel unterhalb 1 % reduziert werden.



05. Spannungsharmonische [250 Hz]



29. Spannungsharmonische [1450 Hz]

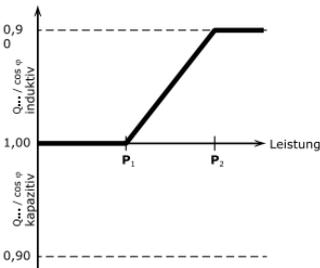
### ■ 13.3: Fachbeitrag Induktive Kompensation „Blindstromkompensation bei Solarparks“

Mit der Energiewende haben sich Solarparks – „Photovoltaik-Anlagen“ oder einfach „PV-Anlagen“ genannt - in den letzten Jahrzehnten als zuverlässiger Energielieferant etabliert. Gerade bei großen Anlagen ist die Optimierung des Gesamtwirkungsgrades ein wichtiger Aspekt, damit die erzeugte Energie nicht nur zuverlässig, sondern auch bezahlbar bleibt. Neben üblichen Maßnahmen an den Solarmodulen selbst, bietet die Optimierung der erzeugten Energie ein wichtiges Potential.

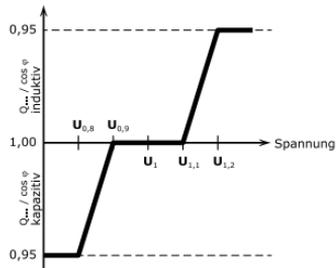
In Deutschland leisten die meisten Solarparks üblicherweise zwischen 1 und 20 Megawatt und unterliegen damit den technischen Richtlinien des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: „BDEW-Richtlinien für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz“. Diese Richtlinie fasst seit 2008 die wesentlichen Gesichtspunkte zusammen, die beim Anschluss einer Erzeugungsanlage an das Mittelspannungsnetz des Netzbetreibers zu beachten sind.

Dazu gehört auch ein „netzgerechter“ Leistungsfaktor am Einspeisepunkt: Bei Wirkleistungsabgabe muss die Erzeugungsanlage in jedem Lastzustand mindestens mit einer Blindleistung betrieben werden können, die einem Leistungsfaktor von  $\cos \varphi = 0,95$  induktiv bis  $0,95$  kapazitiv am Netzanschlusspunkt entspricht. Ein übererregter Betrieb (kapazitiv) würde zu einer Erhöhung der Spannung, ein untererregter Betrieb (induktiv) zu einer Reduzierung der Spannung führen  
→ Erzeugungsanlagen helfen, die Netzspannung zu stützen.

Aufgrund unterschiedlicher Netzausbauten und Belastungszustände ergeben sich auch unterschiedliche Bedürfnisse, deshalb werden die Vorgaben von den Netzbetreibern speziell für den jeweiligen Netzabschnitt vorgeschrieben und können sich von Betreiber zu Betreiber stark unterscheiden. Die Netzbetreiber fassen hierzu ihre Vorgaben in einer Kennlinie zusammen – entweder in Abhängigkeit von der Wirkleistung als „ $\cos \varphi$  (P)-Kennlinie“ oder der Spannung direkt, als „Q(U)-Kennlinie“. Gemäß BDEW-Richtlinie muss der jeweils geforderte Leistungsfaktor innerhalb 10 Sekunden ausgeregelt sein.



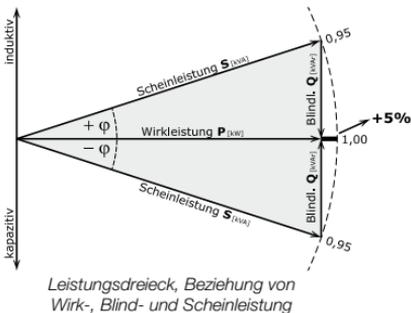
Beispiel  $\cos \varphi$  (P)-Kennlinie



Beispiel Q(U)-Kennlinie

■ **Optimierungsansatz 1:** Moderne Wechselrichter sind blindleistungsfähig und können die von den Solarmodulen gewonnene Energie gemäß den Kennlinien wandeln und entsprechend ins Netz einspeisen - allerdings ergibt sich hieraus ein gewaltiger Nachteil: Die Wechselrichter liefern Scheinleistung - also die geometrische Summe aus Wirk- und Blindleistung! Je schlechter der notwendige Leistungsfaktor ausfällt, desto weniger „bezahlte“ Wirkleistung kann ein Wechselrichter liefern – egal ob im induktiven oder kapazitiven Bereich.

**Beispiel:** Bei einem vorgegebenen Leistungsfaktor von 0,95 müssen die Wechselrichter 33% der Wirkleistung als Blindleistung liefern. Wird jedoch die nötige Blindleistung von einem geeigneten Kompensationssystem bereitgestellt und die Wechselrichter mit einem Leistungsfaktor von 1 betrieben, steigt die Wirkleistungsausbeute bei der gleichen Wechselrichterscheinleistung um 5%!



Um größere Anlagen überhaupt an gegebene Mittelspannungsnetze anschließen zu können, fordern einige Netzbetreiber heute schon einen Leistungsfaktor bis zu  $\cos \varphi$  0,90. In diesen Fällen liegt der Blindleistungsanteil bei 48% der Wirkleistung, die Wirkleistungsausbeute kann durch bereitgestellte Blindleistung sogar um 11 % erhöht werden! Es macht also durchaus Sinn, die Blindleistung separat zu kompensieren, sodass die Wechselrichter die maximal mögliche Wirkleistung liefern können!

■ **Optimierungsansatz 2:** werden moderne Wechselrichter im Leerlauf (besonders nachts oder bei extremer Beschattung durch Bewölkung, Nebel, Schnee ...) betrieben, wird das Netz durch die Leerlaufblindleistung aus der Summe aller Wechselrichter stark kapazitiv belastet. Um dieses Verhalten zu unterdrücken, werden Wechselrichter in solchen Fällen oft abgeschaltet. Dadurch reduziert sich die Lebensdauer allerdings erheblich – auch hier ergibt sich durch eine separate Blindstromkompensation ein wichtiges Optimierungspotenzial.

■ **Optimierungsansatz 3:** Die Kabelstrecken zwischen Solarpark und Mittelspannungs-Anschlusspunkt des Netzbetreibers können durchaus mehrere Kilometer betragen. Aufgrund der dicht beieinander liegenden Leiter, verhalten sich lange Erdkabel kapazitiv – Freileitungen dagegen induktiv. Pro Kilometer verlegter Erdkabelstrecke können einige kVAr kapazitive Blindleistung entstehen. Da diese Blindleistung auf dem Weg zum Solarpark entsteht und die Steuerung der Wechselrichter diese nicht sieht und deshalb auch nicht messen kann, muss diese Blindleistung separat kompensiert werden.

■ **Das Problem:** Die Vorgaben des Netzbetreibers beziehen sich auf den Verknüpfungspunkt der Anlage, das ist der oft mehrere Kilometer vom Solarpark entlegene Anschlusspunkt an der Mittelspannung des Netzbetreibers. Nicht im Solarpark, sondern am Verknüpfungspunkt selbst müssen die BDEW-Richtlinien und Vorgaben der Netzbetreiber eingehalten werden!

■ **Die Lösung:** FRAKO hat sich vor einiger Zeit bei einem mittelgroßen Solarpark eingehend mit den 3 Optimierungsansätzen beschäftigt, ein geeignetes Kompensationssystem projiziert, geliefert und in Betrieb genommen.

## Daten des Solarparks:

- Anlagenleistung:.....3.122 kWp
- jährlicher Ertrag: .....2.849.400 kWh
- Flächengröße: .....4,7 ha
- jährliche CO<sub>2</sub>-Einsparung:.....1.710 t
- Entfernung des Parks zum Verknüpfungspunkt: .....5 km

## Vorgaben des Netzbetreibers:

- bei Rückspeisung soll der Zielleistungsfaktor bei  $\cos \varphi$  0,95 induktiv liegen
- bei Energiebezug darf der Leistungsfaktor nie kapazitiv sein
- gemäß BDEW-Richtlinien muss innerhalb 10 Sekunden auskompensiert sein.

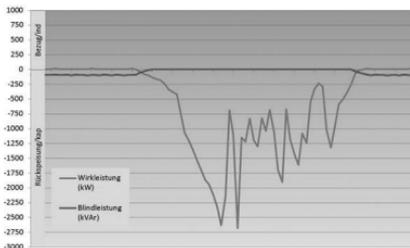
Durch diese Vorgaben ergibt sich die Erfordernis, tagsüber die erforderliche dynamische Blindleistung des gesamten Solarparks zuzüglich der Kabelkapazität, sowie nachts die Leerlaufblindleistung der Wechselrichter, inklusive der Kabelkapazität zu kompensieren.

## Ermittelte Blindleistungen:

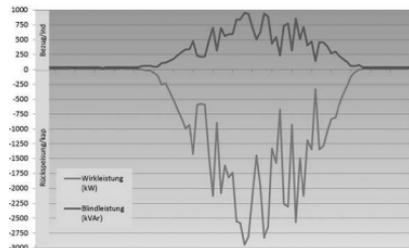
- Die erforderliche Blindleistung durch die Umstellung der Wechselrichter auf  $\cos \varphi = 1$  beträgt insgesamt 950 kVAr induktiv (ca. 1/3 der Wirkleistung).
- Gesamte Leerlaufblindleistung der 141 Wechselrichter: 98 kVAr kapazitiv.
- Kabelblindleistung bei Teil- und Vollast: 45-90 kVAr kapazitiv.

Da alle 3 Bedarfe induktive Blindleistung erforderten, wurde ein Kompensationssystem mit insgesamt 990 kVAr induktiver Blindleistung, aufgeteilt in 7 Schrankeinheiten projektiert. Das Kompensationssystem wurde mit unterschiedlich großen Stufen, bestehend aus verlustarmen Induktivitäten, Schaltgeräten und Gruppenabsicherungen aufgebaut. Wichtig war die Erfassung und Auswertung der unterschiedlichen Blindleistungsbedarfe. Hierzu wurde eine Messung am entlegenen Verknüpfungspunkt mit einer Messung direkt im Solarpark verknüpft und an einen intelligenten Blindleistungsregler weiter gegeben, welcher die Stufen des Kompensationssystems innerhalb den vorgegebenen 10 Sekunden schaltet und dauerhaft überwacht.

- **Das Ergebnis:** Mit dem, durch das Kompensationssystem erreichten Wirkleistungsmehrtrag konnte sich das gesamte System bereits nach 1,8 Jahren amortisieren und fortan den Ertrag des Solarparks um 5% steigern.



Blind- und Wirkleistung ohne Kompensation



Blind- und Wirkleistung mit Kompensation







FRAKO Kondensatoren- und Anlagenbau GmbH  
Tscheulinstraße 21a  
79331 Teningen  
Telefon: +49 7641 453-0  
Fax: +49 7641 453-535  
info@frako.com  
**www.frako.com**